

MAURO LUIZ PANGRÁCIO

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE FUROS REALIZADOS POR
FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa

CURITIBA

2003

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao ser supremo que nos ilumina e nos garante a vida como um sopro divino. Que me proporcionou neste período do trabalho a busca do conhecimento e do aprendizado de novas técnicas e aprimoramento interior. Às maravilhas que criou e o homem vem transformando tão rapidamente. Pela luz de meus dias e pelos conhecimentos adquiridos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Mario e Luiza Pangrácio, que me deram educação e a oportunidade de chegar até aqui.

À minha noiva Zilmara pela paciência e dedicação em me ajudar.

Aos meus irmãos Maristela e Mario José aos meus cunhados Nilson e Luciane, e aos meus sobrinhos Nicole, Leticia e Luiz Eduardo.

À Universidade Federal do Paraná por ter me concedido a oportunidade de realizar este trabalho e as condições para o conhecimento adquirido.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa pelo seu tempo disponibilizado, seus conhecimentos e pela paciência em me ajudar a realizar este trabalho.

Aos alunos bolsistas Alcides, Josef, Ivan

Ao coordenador do PG-MEC Prof. Dr. Carlos H. Marchi.

Ao secretário do PG-MEC Sr. Marcio Brandani Tenório.

À Giovanna responsável pelo COMUT.

Ao SENAI/CIMATEC pela oportunidade de utilização dos laboratórios de usinagem e metrologia.

À PUC-PR pela oportunidade de utilização do laboratório de metrologia.

À Fundação de Amparo a Pesquisa da Bahia

Ao Sr. Dario Vaz da empresa Oliklay Ferramentas representante Sandvik.

As Indústrias ROMI pela gentileza do empréstimo da barra de mandrilar – ROMICRON.

Aos amigos Athos G. Pereira, Giovana, Jean C. dos Santos, José Maria Araújo, Maria Aparecida da S. Santos, Ricardo dos Santos, Roberley Assad.

A Tia Leonor Lezan pela ajuda e presteza, a Zaor e Zilia Caetano pelas palavras de conforto e otimismo.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE GRÁFICOS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E LISTA DE SIGLAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 01	
1.1 Condições Gerais de Furação.....	01
1.2 Objetivo.....	03
1.3 Organização do Trabalho.....	04
CAPÍTULO 02	
2.1 Estado da Arte.....	05
2.2 Furação.....	07
2.2.1 Particularidades do processo de furação.....	08
2.2.2 Classificação das brocas quanto à forma e às aplicações.....	09
2.2.3 Aplicação do processo de furação.....	12
2.2.4 Seleção de brocas.....	13
2.2.5 Representação cinemática do processo de furação.....	14
2.3 Mandrilamento.....	14
2.3.1 Particularidades do processo de mandrilamento.....	15
2.3.2 Classificação das ferramentas de mandrilar.....	15
2.3.3 Aplicação do processo de mandrilamento.....	16
2.3.4 Seleção dos mandriladores.....	16
2.4 Alargamento.....	17
2.4.1 Particularidades do processo de alargamento.....	17
2.4.2 Classificação dos alargadores.....	18
2.4.3 Aplicação dos alargadores.....	19
2.4.4 Seleção dos alargadores.....	19

2.5 Brunimento.....	19
2.5.1 Particularidades do processo de brunimento.....	20
2.5.2 Classificação dos brunidores.....	20
2.6 Retificação Cilíndrica Interna.....	20
2.6.1 Particularidades do processo de retificação.....	21
2.6.2 Classificação dos rebolos.....	22
2.6.3 Aplicação do processo de retificação.....	22
2.6.4 Seleção dos rebolos.....	22
2.7 Brochamento.....	23
2.8 Processos de Usinagem não Convencionais.....	24
2.8.1 Eletroerosão a fio.....	24
2.8.2 Corte a jato d'água com abrasivo.....	25
2.8.3 Corte plasma.....	25
2.8.4 Corte a laser.....	26
2.9 Avaliação da Qualidade de Furos.....	27
CAPÍTULO 03	
3.1 Estudo do Processo FHI e Processos Semelhantes.....	31
3.2 Estudo da Cinemática do Processo.....	32
3.2.1 Fresamento.....	32
3.2.2 Particularidades do processo de fresamento.....	32
3.2.3 Classificação das fresas quanto à forma e aplicações.....	33
3.2.4 Aplicações do processo de fresamento.....	33
3.2.5 Fresamento Helicoidal Interpolado.....	35
CAPÍTULO 04	
4.1 Materiais e Métodos.....	48
4.2 Estudo Preliminar.....	54
4.2.1 Parâmetros de usinagem para o estudo preliminar.....	55
4.2.2 Realização da usinagem.....	55
4.2.3 Análise dimensional.....	56
4.3 Estudo da influência dos parâmetros v_c , v_{fc} e f_{az}	57

4.3.1 Parâmetros de usinagem da segunda etapa.....	58
4.3.2 Realização da usinagem.....	59
4.3.3 Análise dimensional.....	59
4.4 Estudo da influência do tipo de fresamento (concordante x discordante).....	60
4.4.1 Parâmetros de usinagem com pré-furo.....	60
4.4.2 Realização da usinagem.....	61
4.4.3 Análise dimensional.....	61
4.5 Fresamento com pré-furo utilizando mandrilamento.....	61
4.5.1 Parâmetros de usinagem do mandrilamento.....	62
4.5.2 Realização da usinagem.....	62
4.5.3 Análise dimensional.....	63
4.6 Estudo da influência do tipo de máquina.....	63
4.6.1 Parâmetros de usinagem.....	63
4.6.2 Realização da usinagem.....	63
4.6.3 Análise dimensional.....	64
Capítulo 05	
5.1 Resultados e Discussões.....	65
5.1.1 Estudo Preliminar.....	65
5.1.2 A influência dos parâmetros v_c , v_{fc} e f_{az}	67
5.1.3 A influência do tipo de fresamento (concordante x discordante).....	73
5.1.4 Comparação com o processo de mandrilamento.....	75
5.1.5 Estudo da influência do tipo de máquina (M1 x M2).....	77
5.1.6 Estudo da rugosidade comparada ao tempo de usinagem.....	78
CAPÍTULO 06	
6.1 CONCLUSÕES.....	81
CAPÍTULO 07	
7.1 REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICES	

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Parâmetros de rugosidade comparados aos processos.....	12
TABELA 2	Relação de rugosidade com a profundidade e granulação.....	22
TABELA 3	Composição Química do aço ABNT 1045.....	49
TABELA 4	Informações gerais sobre o centro de usinagem M1.....	50
TABELA 5	Informações gerais sobre o centro de usinagem M2.....	51
TABELA 6	Parâmetros de corte do estudo preliminar.....	55
TABELA 7	Parâmetros de corte para a influência dos parâmetros v_c , v_{fc} , f_{az} ..	58
TABELA 8	Parâmetros de corte para o fresamento (concordante x discordante).....	60
TABELA 9	Parâmetros de corte para o mandrilamento.....	62
TABELA 10	Parâmetros da máquina M1 para a realização dos furos em cheio.....	63
TABELA 11	Análise dimensional, entre três planos, após o estudo preliminar com $v_c=135\text{m/min}$ e $v_{fc}= 400$ e 600m/min	67
TABELA 12	Resultados da rugosidade R_a na segunda etapa.....	69
TABELA 13	ANOVA sobre a influência dos fatores f_{az} , v_{fc} e v_c no R_a	70
TABELA 14	ANOVA para o R_a com um grau de liberdade.....	70
TABELA 15	ANOVA para o $R_{m\acute{a}x}$ com um grau de liberdade.....	71
TABELA 16	ANOVA para a influência dos parâmetros f_{az} , v_{fc} e v_c na circularidade.....	71
TABELA 17	ANOVA da cilindricidade com um grau de liberdade.....	72
TABELA 18	Teste estatístico do R_a para os tipos de fresamento concordante e discordante.....	73
TABELA 19	Teste estatístico do $R_{m\acute{a}x}$ para os tipos de fresamento concordante e discordante.....	73
TABELA 20	Representação dos parâmetros de corte com os dados obtidos.....	75
TABELA 21	Representação dos valores médios de R_a na comparação das máquinas.....	77

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Representação de diferentes tipos de furos.....	07
FIGURA 2	Broca helicoidal com haste cilíndrica e haste cônica.....	10
FIGURA 3	Broca canhão.....	11
FIGURA 4	Representação das condições cinemáticas na furação.....	14
FIGURA 5	Representação do mandrilamento de furos.....	15
FIGURA 6	Ferramenta de mandrilar com cápsula e micrômetro.....	16
FIGURA 7	Alargador helicoidal com haste cônica.....	18
FIGURA 8	Retificação cilíndrica interna de furos.....	21
FIGURA 9	Representação da circularidade.....	28
FIGURA 10	Representação de cilindridade.....	29
FIGURA 11	Fresa de Topo Toroidal.....	33
FIGURA 12	Fresamento concordante.....	34
FIGURA 13	Fresamento discordante.....	34
FIGURA 14	Representação Velocidade de avanço x diâmetro da fresa.....	36
FIGURA 15	Representação dos componentes I e J do programa CNC.....	39
FIGURA 16	Representação do fresofuração e fresomandrilamento.....	40
FIGURA 17	Representação do processo de fresotorneamento.....	40
FIGURA 18	Representação da ferramenta na realização do furo.....	41
FIGURA 19	Representação do processo de interpolação helicoidal.....	42
FIGURA 20	Representação do ângulo de incidência da ferramenta na entrada e saída do furo.....	42
FIGURA 21	Representação da ferramenta na subida e na descida.....	43
FIGURA 22	Representação do material no núcleo da ferramenta.....	44
FIGURA 23	Representação gráfica do movimento da ferramenta.....	46
FIGURA 24	Representação do fluxograma do experimento.....	48
FIGURA 25	Desenho esquemático sobre a geometria e cinemática do centro de usinagem M1.....	50

FIGURA 26	Desenho esquemático sobre a geometria e cinemática do centro de usinagem M2.....	51
FIGURA 27	Desenho da fixação e parâmetros de montagem da fresa.....	52
FIGURA 28	Representação da pastilha de corte.....	52
FIGURA 29	Desenho esquemático do posicionamento e fixação dos corpos de prova.....	53
FIGURA 30	Representação dos canais de refrigeração.....	53
FIGURA 31	Região dos furos escolhida para medida da rugosidade.....	54
FIGURA 32	Montagem da bancada para medição da rugosidade.....	54
FIGURA 33	Representação da sequência dos furos na primeira etapa.....	56
FIGURA 34	Representação gráfica do tratamento das combinações.....	58
FIGURA 35	Representação da sequência dos furos na segunda etapa.....	59
FIGURA 36	Representação da sequência dos furos na terceira etapa.....	61
FIGURA 37	Representação dos furos mandrilados.....	62
FIGURA 38	Representação da sequência dos furos na etapa cinco.....	64

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1	Representação dos processos de usinagem.....	06
GRÁFICO 2	Representação da rugosidade Ra x parâmetros de corte.....	69
GRÁFICO 3	Representação da rugosidade R _{máx} x parâmetros de corte.....	70
GRÁFICO 4	Representação da circularidade no FHI em cheio.....	71
GRÁFICO 5	Representação da cilindridade no fresamento em cheio.....	72
GRÁFICO 6	Representação do Ra médio no FHI discordante e concordante...	74
GRÁFICO 7	Representação do R _{máx} médio no FHI discordante e concordante.....	74
GRÁFICO 8	Representação da circularidade para o FHI discordante e concordante.....	75
GRÁFICO 9	Representação do Ra e R _{máx} no processo de mandrilamento....	76
GRÁFICO 10	Representação da média da circularidade no mandrilamento.....	76
GRÁFICO 11	Representação dos valores médios de Ra na comparação das máquinas.....	77
GRÁFICO 12	Representação da circularidade média no FHI comparando as máquinas.....	78
GRÁFICO 13	Representação da cilindridade média no FHI comparando as máquinas.....	78
GRÁFICO 14	Representação do Ra x tempo no FHI em cheio.....	79
GRÁFICO 15	Representação do Ra x tempo no mandrilamento.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CAM	Manufatura Integrada por Computador
DIN	Deustschland Institut Normalzustand
EDM	Electrical-discharge Machining
FHI	Fresamento Helicoidal Interpolado
ISO	International Standart Organization
NBR	Norma Brasileira
PCBN	Policristalino Cúbico de Nitreto de Boro
SAE	Standart American Engeniring

LISTA DE SIGLAS

ap	mm	Profundidade de Corte
di	mm	Diâmetro do inserto
dm	mm	Diâmetro médio do percurso da ferramenta
Df	mm	Diâmetro do furo
Dfr	mm	Diâmetro da fresa
f	mm/v	Avanço por rotação
f _z	mm	Avanço por dente
f _c	mm	Avanço de corte
f _{az}	mm/v	Avanço axial circular
M1		Máquina 01
M2		Máquina 02
n	rpm	Rotação
Pa	Pa	Pascal
v _c	m/min	Velocidade de corte

v_e	m/min	Velocidade resultante de corte
v_{fc}	mm/min	Velocidade de avanço circular
v_{fa}	mm/min	Velocidade de avanço axial
v_{fr}	mm/min	Velocidade de avanço radial
Ra	μm	Rugosidade média
Rmáx	μm	Rugosidade máxima
z		Número de arestas da ferramenta

RESUMO

A confecção de furos em máquinas é, geralmente, obtida pelo processo de furação. Mas quando necessitamos de alta qualidade final, ainda se empregam, por exemplo, os processos de mandrilamento, alargamento e brunimento. Em máquinas CNC, centros de usinagem ou fresadoras, podem, ainda, utilizar o processo de fresamento. Isto é alcançado graças aos recursos de interpolação helicoidal deste tipo de máquina. Na fabricação de furos de grandes diâmetros, o fator limitante é o diâmetro das brocas. Nos processos de mandrilamento, alargamento e brunimento, deve-se realizar um pré-furo para que a ferramenta possa executar a usinagem. Porém, com as recentes melhorias em geometrias e materiais de ferramentas aliados aos recursos de programação CN, pode-se obter furos de grandes diâmetros sem necessidades de pré-furo. O objetivo deste trabalho é a avaliação da qualidade de furos obtidos pelo processo de fresamento helicoidal interpolado. A usinagem foi realizada em cheio e em acabamento com pré-furo, em uma placa de SAE 1045 normalizado com uma fresa de topo toroidal de insertos intercambiáveis em metal duro. As variáveis independentes foram o tipo fresamento (concordante X discordante) e a velocidade de avanço em dois níveis. A qualidade dos furos foi avaliada pela rugosidade (R_a), a circularidade e a cilindricidade. Os resultados obtidos até o momento permitem concluir que a qualidade é satisfatória. Além disso, e mais importante, pode-se concluir também que a opção por este tipo de operação possibilita a racionalização de ferramentas de corte. A ferramenta em teste, por exemplo, pode ser utilizada em outras operações, tais como o fresamento frontal.

ABSTRACT

The hole making is in general, done by drilling process. However, depending on the quality requirements, other process like; boring, reaming or honing is demanded. Nowadays, the shop floors equipped with CNC machines and standard end or face mills can count on a new cutting strategy. This one is called interpolated helical milling (IHM). This new option is recommended by the tool manufacture as an advantageous technique in machining of large holes. The main purpose of this paper is to present the results of the evaluation of 35 - 38mm diameter milled holes. This evaluation was based on surface roughness (R_a or R_{max}), roundness and cylindricity. Twelve holes were milled in a SAE 1045 steel plate without previous drilling. All tests carried out in a vertical machine center using a thoroidal milling cutter with coated cemented carbides. The better surfaces were achieved less material removal rate. Despite of a higher cutting time, IHM allow tool inventory reduction, because the same tool can be applied in other operations, such as peripheral and face milling. The interpolated helical milling is an economic process for rough large holes in CNC machines; the final quality was IT8 or poorer in some conditions; less material remove rate is required to achieve better tolerances.

CAPÍTULO 01

1.1 CONDIÇÕES GERAIS DE FURAÇÃO

Furos são elementos muito comuns e importantes “features” em peças mecânicas. Empregados em várias peças e produtos desempenham importantes funções, como: condutores de fluídos, alojamento de rolamentos, interiores de roscas, acoplamento de eixos, buchas, fixação e outras. Nas indústrias metal-mecânica tem-se várias opções para realizá-los, dependendo das formas e condições em que eles se encontram nas peças.

Os furos podem ser realizados por diferentes processos, cada um com suas características e importâncias dentro da manufatura. Entre os processos mais utilizados, podem ser citados: a conformação, oxicorte, corte-plasma, corte a laser, corte por jato d’ água com abrasivo, eletroerosão a fio e outros, onde a produtividade é o objetivo principal destes processos. Nos processos tradicionais, têm-se a furação e o fresamento, que são processos de usinagem realizados por remoção de material com geração de cavaco, e muitas vezes necessitam de um processo posterior para atingir o acabamento dimensional e superficial desejado no furo. Este processo posterior pode ser o mandrilamento, o brunimento, a retificação interna ou até mesmo o brochamento. Estes processos de acabamento são caracterizados pelo pequeno volume de cavaco que retiram e pela possibilidade de melhor qualidade superficial e dimensional. Os processos são selecionados conforme as seguintes condições: o material a ser usinado, o tipo de furo a ser realizado, a relação comprimento/diâmetro, o acabamento superficial e dimensional, e as tolerâncias geométricas.

O processo de furação é o processo mais competitivo, flexível, com secção circular e o mais utilizado para a realização de furos na maioria dos materiais, e em condições variadas. Porém, é considerado um processo de usinagem de desbaste (Ferraresi, 1970; Stemmer, 1992). Além disso, necessita de um grande número de ferramentas disponíveis para poder realizar a operação, exigindo a troca das mesmas, o que ocasiona consumo elevado de tempo de preparação. Isso muitas vezes, pode

comprometer o acabamento dos furos em relação à rugosidade, a circularidade e a cilindridade, exigindo um segundo processo.

Com base nestes fatos, acredita-se que com o processo de fresamento seja possível a obtenção de melhores resultados, pois oferece melhor condição de acabamento superficial e melhor condição dimensional. As fresas possuem uma gama maior de diâmetros, melhores relações comprimentos/diâmetros e condições de realizar furos em cheio, utilizando apenas uma ferramenta com grandes diâmetros e elevadas profundidades, mantendo a qualidade aceitável. Mas é possível, em casos especiais, lançar mão de processos de brunimento, alargamento, ou retificação interna quando, há necessidade de alta qualidade dimensional e tolerâncias geométricas de forma muito justas.

No caso de manufatura de lotes pequenos de peças, como os moldes e matrizes, o impacto do custo das ferramentas é muito significativo. Frequentemente as ferramentarias enfrentam este problema na realização de grandes furos para a fixação das colunas guias. Neste caso especial são realizados os processos de fresamento e mandrilamento ou, fresamento e alargamento, em conjunto. Entretanto, a realização de um simples furo torna-se uma tarefa cara.

Atualmente, com o desenvolvimento das máquinas ou fresadoras equipadas com Comando Numérico Computadorizado (CNC), e o aprimoramento das ferramentas com insertos intercambiáveis, o fresamento pode ser um processo mais flexível e competitivo para a realização de furos com grandes diâmetros, onde estas ferramentas podem ser utilizadas também para faceamento e/ou desbaste de superfícies planas e /ou complexas. Isso se deve às novas geometrias e materiais de ferramentas que têm surgido no mercado, reduzindo assim o inventário das mesmas.

As máquinas fresadoras ou centros de usinagem equipados com comando CNC oferecem o recurso da interpolação helicoidal, muito pouco conhecido entre os operadores. É um sistema onde o processo descreve o movimento de uma hélice e pode realizar furos em cheio, através do movimento sincronizado da mesa em dois eixos e a ferramenta descendo em profundidade ou, em algumas máquinas, a ferramenta realiza o movimento nos três eixos simultaneamente.

Nesta dissertação, empregou-se um material muito utilizado nas ferramentarias para realização de moldes e matrizes: uma chapa de aço, SAE 1045 que é empregado devido a sua dureza, como placa guia, matriz, porta-punção.

O trabalho foi dividido em etapas. Na primeira etapa fez-se um estudo observacional sem um rigor dos resultados obtidos. Seguindo as recomendações dos parâmetros do catálogo do fabricante da ferramenta, realizou-se 12 furos em cheio, na placa de aço SAE 1045 pelo sistema de fresamento helicoidal interpolado (FHI), e avaliou-se o dimensional dos furos.

Na segunda etapa, após análise da primeira, definiu-se novos parâmetros de corte e condições de usinagem. Utilizando um projeto fatorial 2^3 do experimento, realizaram-se 8 furos em cheio em uma placa de aço SAE 1045 normalizado pelo sistema de FHI e nesta etapa avaliou-se a rugosidade (R_a e $R_{máx}$), a circularidade e a cilindricidade.

Na terceira etapa, fez-se a análise do processo de acabamento, utilizando o FHI discordante x concordante, de três furos em cada condição de corte, com os melhores parâmetros de corte obtidos pelo fresamento em cheio.

Utilizando uma barra de mandrilar, realizou-se a etapa quatro, comparando-se o acabamento superficial do mandrilamento, com os melhores resultados do FHI de acabamento do discordante x concordante. Isso foi realizado na peça da primeira etapa, pois estes processos de acabamento exigem pré-furo.

Por fim, com os valores obtidos em relação aos mesmos processos e as máquinas M1 e M2, fez-se uma análise da influência da cinemática das máquinas no processo de FHI para desbaste e acabamento.

1.2 OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo avaliar a qualidade de furos (rugosidade R_a e $R_{máx}$, circularidade e cilindricidade) pelo fresamento helicoidal interpolado, utilizando uma ferramenta de faceamento, também conhecida como fresa de topo

toroidal, além de avaliar a condição de reduzir o inventário de ferramentas nas empresas de confecção de moldes e matrizes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 01, tem-se uma breve apresentação do problema enfrentado pelas ferramentarias e também do trabalho proposto, como sugestão de um processo que pode ser vantajoso.

No capítulo 02, estudou-se vários processos encontrados nas indústrias metal-mecânica atualmente, desde os tradicionais até os mais modernos e recentes, para a realização de furos.

No capítulo 03, fez-se um estudo do processo de fresamento, dando ênfase ao FHI, com destaque à geometria e à cinemática do processo.

No capítulo 04, apresentaram-se os procedimentos experimentais e os equipamentos utilizados para a realização do trabalho.

O capítulo 05 apresentou-se os valores da rugosidade (R_a e $R_{máx}$), circularidade e cilindricidade, obtidos nos ensaios realizados em função dos parâmetros de corte e condições de usinagem.

Apresentam-se as conclusões referentes ao trabalho no capítulo 06.

As referências são encontradas no capítulo 07.

CAPÍTULO 2

2.1 ESTADO DA ARTE

Os furos são entidades geométricas que podem ser realizados por diferentes processos. Os processos mais modernos visam a produtividade, e na sua maioria, a redução da geração de cavaco, não se preocupando tanto com a qualidade dimensional e superficial do furo. Estes processos têm alguns limitantes com relação aos materiais e à espessura a ser cortada.

Como processos tradicionais e modernos, considerados não convencionais, podem ser encontrados: eletroerosão a fio, corte plasma, corte laser, corte por jato de água com abrasivo, oxicorte e conformação. Na maioria das vezes, estes processos requerem um posterior acabamento superficial e dimensional, sendo assim, não são utilizados em condições que necessitem de precisão dimensional e qualidade elevada. O único processo que se tem boas condições e qualidade com peças de grandes dimensões, comparadas aos outros processos, é a eletroerosão a fio, porém o limitante é o tempo para realizar esta operação.

Os processos mais tradicionais para realizar furos têm atendido com grande satisfação à produção. Processos com arrancamento de cavaco também apresentam alguns fatores limitantes, mas atendem satisfatoriamente, até o presente momento, às condições de usinagem.

Com o desenvolvimento de novos materiais para atender a alguns requisitos, principalmente os de temperatura e dureza, as mudanças foram progressivamente exigindo condições de melhorias nos processos de manufatura. As ferramentas também tiveram suas adaptações de geometrias, de superfícies revestidas e de cortes com grandes remoções de materiais melhoradas, ganhando com isso uma maior produtividade.

Contudo, o processo de furação ainda é o meio mais comum, entre todos, para realização de furos, conforme pode ser visto nos gráficos a seguir, considerando os processos com retirada de materiais (Santos, 1999).

GRÁFICO 1 – Representação dos processos de usinagem



Fonte: Tönshoff et al, 1994

O gráfico demonstra o tempo de usinagem empregado para cada processo e o número de operações realizadas nas empresas metal-mecânicas.

Mas, mesmo assim, a furação é um processo limitado por alguns fatores importantes como: diâmetro da broca, profundidade de furação, investimento em grandes quantidades de ferramentas, relação comprimento/diâmetro, qualidade desejada dos furos em relação à rugosidade e circularidade.

O fresamento também tem alguns limitantes se realizado dentro do sistema tradicional com máquinas convencionais que oferecem poucos recursos de trajetórias de ferramentas e condições de corte. Porém, com a evolução das máquinas ou fresadoras equipadas com comando CNC, as condições de corte passam a ser diferenciais e com opções até então não encontradas no mercado; isso será melhor detalhado no capítulo 03. Com melhores ferramentas e máquinas, disponibilizando recursos cada vez mais sofisticados, tende-se a reduzir os processos de acabamento posterior à furação.

Alguns processos que são realizados posteriormente às operações tradicionais de furação e fresamento para melhorias de acabamento são, por exemplo: alargamento, mandrilamento, brunimento, brochamento e retificação interna. Nestes processos, tem-se uma pequena remoção de material, um melhor acabamento superficial e dimensional. Estas operações só podem ser realizadas em peças com pré-furo.

Como mencionado, existem vários processos que podem ser utilizados para manufatura de furos, cada um com suas características e particularidades, dependendo muito da situação a ser enfrentada. Sendo assim, neste capítulo fez-se um estudo

visando maiores informações com relação às limitações dos processos tradicionais e não tradicionais e à qualidade que proporcionam.

A furação tem um destaque maior devido a sua grande utilização, ao volume de bibliografias e a sua realização em grandes e pequenas empresas, em máquinas com estruturas de grande e pequeno porte. Sendo assim, por sua larga demanda, mereceu uma atenção maior.

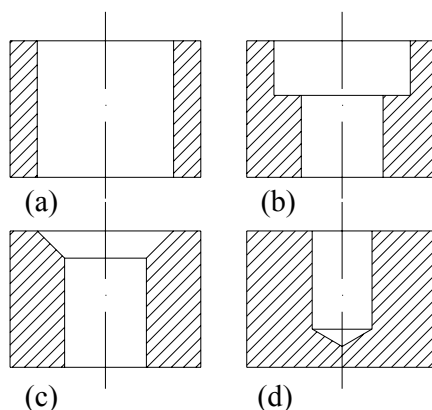
2.2 FURAÇÃO

A furação é o processo de usinagem que tem por objetivo a obtenção de furos cilíndricos, no qual a ferramenta executa o movimento rotativo principal, e o movimento de avanço é realizado segundo o sentido do eixo de rotação (König, apud DIN 8589, 1978).

Dentro dos processos de usinagem para abertura de furos, o processo mais empregado é a furação. Porém, existem alguns limitantes para este processo quando se tem que realizar furos com grandes diâmetros. As brocas têm restrições de dimensões para realização de grandes diâmetros e/ou furações profundas, gerando a necessidade de utilização de outros processos e/ou processos especiais de furação.

A figura abaixo representa alguns tipos de furos que podem ser realizados por diferentes processos.

FIGURA 1 – Representação de diferentes tipos de furos: a)furo cheio, b)furo com rebaixo, c)furo escariado, d)furo cego.



O processo de furação pode ser classificado em (Ferraresi, 1970):

(a) Furação em cheio

Processo destinado à obtenção de um furo cilíndrico em uma peça, onde todo o material contido no volume do furo é retirado na forma de cavaco.

(b) Furo com rebaixo

Processo de furação onde se tem dois diâmetros diferentes no mesmo furo, porém com profundidades diferentes. O diâmetro menor é passante e o maior tem uma menor profundidade, e geralmente é utilizado para alojar parafusos.

(c) Furo escariado

Processo de furação onde o diâmetro maior é em ângulo. Utiliza-se para alojar parafusos de cabeça chata.

(d) Furo Cego

Processo de furação onde uma parte do material contido no volume do furo não é removido, ou seja, a ferramenta não atravessa a peça.

2.2.1 Particularidades do processo de furação

A operação de furação é considerada uma operação de desbaste (Stemmer, 1992). Desta forma, exige outras operações para os furos que necessitam de uma melhor precisão dimensional, uma menor rugosidade, uma maior precisão de forma e/ou de alinhamento.

As operações de furação são realizadas sob condições relativamente severas. A velocidade de corte não é uniforme e o fluido de corte chega com dificuldade ao gume da ferramenta, onde deveria atuar para refrigeração e lubrificação da peça, bem como para a remoção dos cavacos da área que está sendo furada (König, 1981, Stemmer, 1992).

A furação para grandes diâmetros pode ser realizada com a utilização de várias brocas até chegar ao diâmetro desejado. Recomenda-se chegar à profundidade máxima na proporção de comprimento x diâmetro, porém, para alguns casos, têm-se que realizar várias operações de furação e trocas de ferramentas, podendo acarretar em desvios de linearidade e deficiência na centralização dos furos. Faz-se necessário um

investimento em brocas, e isso também aumentaria o tempo despendido para as trocas de ferramentas. Um processo adicional, visando melhorar o acabamento final, também se faz necessário.

A profundidade de corte no processo de furação é uma grandeza invariável, pois corresponde ao diâmetro da broca. Segundo König há algumas particularidades do processo desfavoráveis em comparação com o torneamento e o fresamento, que são:

- 1 - A velocidade de corte cai até o valor zero no centro da broca;
- 2 - Transporte dificultado dos cavacos;
- 3 - Uma distribuição não adequada de calor na região do corte;
- 4 - O ataque de desgaste pronunciado na quina com canto vivo;
- 5 - O atrito pronunciado das guias na parede do furo.

2.2.2 Classificação das brocas quanto à forma e às aplicações

A furação, como citado anteriormente, é realizada por uma ferramenta chamada broca, que possui diversos tipos e formas, conforme a necessidade da operação de furação, exemplo: brocas helicoidais, brocas canhão, brocas chatas, brocas ocas para trepanação e outros (König, 1981).

Uma grande variedade de brocas está disponível no mercado, fazendo com que os furos possam ser realizados em diferentes diâmetros e comprimentos, brocas estas com formas de hélice, haste e geometrias da cunha cortante diversificadas.

Os vários tipos de brocas são divididos em dois grupos de acordo com a dificuldade de execução do furo (Metals Handbook, 1989):

a - Brocas de uso geral

Neste grupo encontram-se as brocas mais comuns e mais usadas. As alterações na geometria da cunha cortante da ferramenta permitem melhorar o desempenho da operação para determinada condição de avanço, velocidade de corte e material da peça.

b - Brocas para uso em condições severas

São ferramentas desenvolvidas para suportar elevadas tensões de torção e devem apresentar maior rigidez, quando comparadas às brocas de uso geral.

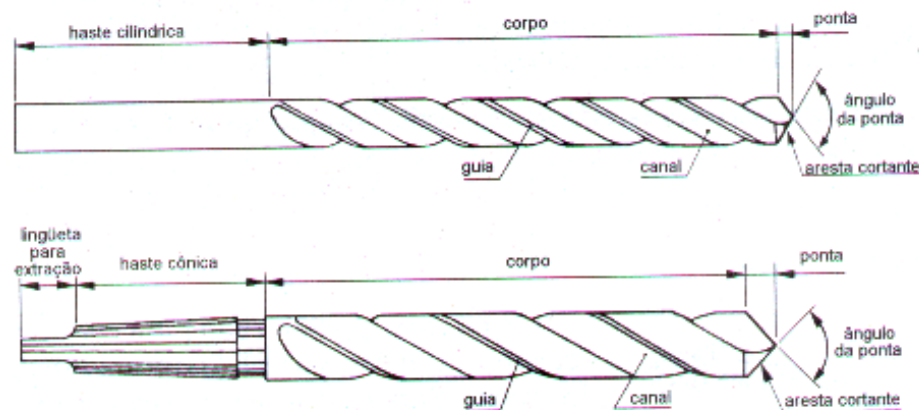
Alguns tipos de brocas são desenvolvidos para satisfazer uma condição específica de usinagem. Através de alterações na dureza do material da broca e em sua geometria, pode-se aumentar a faixa de utilização. A seguir, são apresentados alguns tipos de brocas especiais e as suas aplicações (Metals Handbook, 1989):

b.1 - Broca Helicoidal

A broca helicoidal apresenta grande versatilidade, baixo custo e possui uma grande faixa de diâmetros, o que a torna aplicável na usinagem dos aços, dos ferros fundidos e dos materiais não ferrosos.

O uso de brocas helicoidais na operação de pré-furação para uma condição de desbaste produz tolerâncias de fabricação que variam entre as qualidades ISO IT11 e IT14. Com brocas helicoidais de metal duro integral, pode-se alcançar tolerâncias de diâmetro dentro da faixa IT8 e, em casos especiais, IT7 (da Silva, 2001, König, 1981).

FIGURA 2 – Broca helicoidal com haste cilíndrica e haste cônica



Fonte: Livro Ferramenta de Corte II - Stemmer, 1992 pg 32

b.2 - Broca com canais internos para injeção de fluido de corte

Os canais que atravessam a broca no sentido longitudinal têm por objetivo permitir a injeção de fluido a alta pressão na região de corte, o que promove a retirada de cavacos, impedindo que estes venham a obstruir a saída do furo e causar danos a sua superfície interna.

A haste deste tipo de broca pode apresentar forma cilíndrica ou cônica. As brocas com haste cilíndrica são adequadas para executar furos profundos em metais de

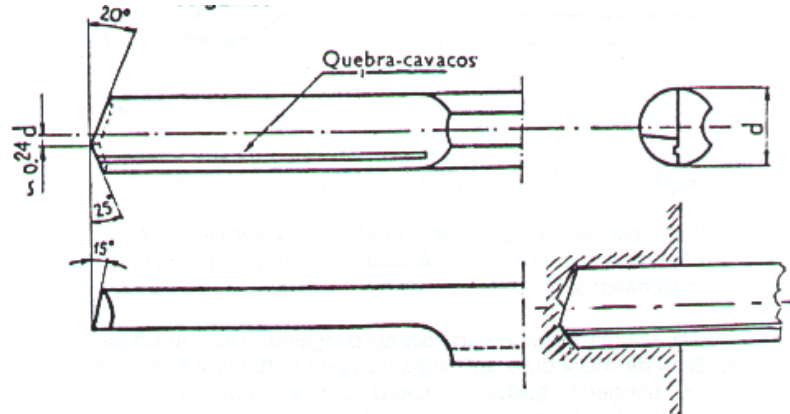
dureza elevada. As brocas com hastes cônicas são utilizadas em furação fora da posição normal ou quando há dificuldade de acesso do fluído à região do corte.

b.3 - Broca Canhão

Esta broca é aplicada na execução de furos horizontais profundos. Possui um canal em “V” e a região de corte é afiada de modo a formar dois ângulos de corte, que durante a furação geram dois cavacos que se quebram, facilitando assim suas remoções. Contra pesos são utilizados para balancear as forças geradas pela ação de um único gume de corte.

Devido à característica de se auto guiar, esta broca é capaz de fazer furos profundos com ótima linearidade.

FIGURA 3 – Broca canhão



Fonte: Livro Ferramenta de Corte II - Stemmer, 1992 pg 39

Os furos são realizados, em sua maioria, por brocas helicoidais, tanto na fabricação de furos cilíndricos, como pré-furos ou furos maciços.

Isso representa, no total dos processos de usinagem, uma faixa de 20 a 25% da utilização de brocas helicoidais no processo de furação, sendo então a ferramenta com maior número de fabricação e também a mais difundida para a usinagem (König apud Hauser, 1979).

O processo de furação com brocas helicoidais não deve ser incluído no processo que leva a uma qualificação boa da superfície, quando comparado com o processo de torneamento interno. Por exemplo, a furação leva a uma rugosidade grande na parede do furo, o que não se deseja para uma operação de acabamento (König apud Soar, 1960).

Comparativamente a outros processos de usinagem, para a furação existem condições de compatibilidade bem diferentes do que para o torneamento ou para a furação com brocas de pastilhas intercambiáveis. O acesso difícil ao local de remoção de cavaco compromete a saída dos mesmos e, conseqüentemente, a segurança do processo (Weinert, 2002).

O processo de furação realizado pela broca canhão, uma ferramenta especial muito pouco utilizada, pode realizar furos profundos e com diâmetros que variam de 10 a 100 mm. Essas brocas podem ser utilizadas com pastilhas de metal-duro, com a remoção do cavaco pelo canal externo. Esse processo se assemelha muito ao mandrilamento, porém é necessária a realização de pré-furos.

Para furação em série de grandes diâmetros, ficaria inviável a utilização deste processo, mesmo sendo realizado por brocas de uma aresta e brocas canhão, devido à necessidade de realizar pré-furos até o diâmetro final. Com o intuito de ganhar tempo, as várias furações necessárias até o diâmetro desejado acarretariam em um processo demorado, com altos investimentos de ferramentas e acabamento superficial inadequado.

Abaixo se tem uma tabela comparativa de valores de rugosidade encontrados nos diferentes processos para realização de furos.

TABELA 1 – Parâmetros de rugosidade comparados aos processos

Classes de Rugosidade	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
Brocas helicoidais												
Alargadores												
Brochas												
Ferram. de brunir												
Broca ferram.profunda												
Rugosidade Ra (μm)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025



Valores que podem ser obtido em condições normais de uso



Valores que podem ser obtido em condições especiais de uso

Fonte: König, 1981 pg 271 vol.II

2.2.3 Aplicação do processo de furação

Vários são os fatores que influenciam na operação de furação. Abaixo relacionam-se alguns destes fatores (Santos, 1999):

a - Material da peça

O processo de furação pode ser aplicado em materiais com dureza de até 60 HRC. Essa faixa de dureza engloba a grande maioria dos materiais de construção mecânica, inclusive alguns aços para ferramentas. Os aços especiais, como os aços-rápidos, alguns aços ferramenta para trabalho a frio e a quente e para moldes de injeção de plásticos, possuem dureza superior à indicada para a furação, o que obriga a adoção de outras técnicas para obtenção de furos nesses materiais.

b - Diâmetro do furo

As brocas mais empregadas possuem diâmetros que variam de 3,2 a 38 mm (1/8 a 1 1/2 polegadas). Brocas especiais permitem a execução de furos com até 152 mm de diâmetro.

c - Relação comprimento / diâmetro do furo

Este fator depende do método utilizado e do desvio de linearidade requerido. Os métodos mais simplificados permitem que o comprimento do furo seja até 3,5 vezes maior que o seu diâmetro. A utilização de ferramentas, técnicas e equipamentos especiais permitem a elevação desta relação em 8 vezes ou mais. Sistemas especiais de furação, conhecidos como trepanação, e com a utilização de broca canhão, permitem a execução de furos com relação comprimento/diâmetro superior a 100 em uma faixa de diâmetros de 6 a 750 mm.

2.2.4 Seleção de brocas

A escolha da broca mais adequada para uma determinada operação depende de uma série de fatores. Os principais fatores a serem considerados no processo de seleção são (Metals Handbook, 1989):

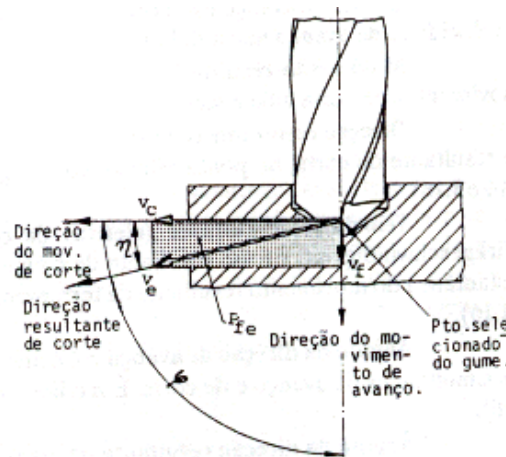
- Composição e dureza do material
- Rigidez do mandril
- Dimensões do furo a ser executado
- Máquina-ferramenta utilizada
- Presença ou não de pré-furo

- Tolerância requerida para furo
- Número de operações
- Custo

2.2.5 Representação cinemática do processo de furação

Na figura 4, pode-se verificar os vetores que definem os movimentos de corte na furação. Pela definição, tem-se o movimento de avanço v_f , no qual a ferramenta penetra na peça, o movimento de corte v_c , que é o movimento de rotação da ferramenta, e o movimento resultante de corte v_e que é a simultaneidade do movimento de corte com o movimento de avanço. Com isso tem-se a furação.

FIGURA 4 – Representação das condições cinemáticas na furação



Fonte: Livro Ferramenta de Corte II - Stemmer, 1992 pg 36

2.3 MANDRILAMENTO

Segundo a NBR 6175, o mandrilamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma barra ou várias ferramentas de barra (Ferraresi, 1970).

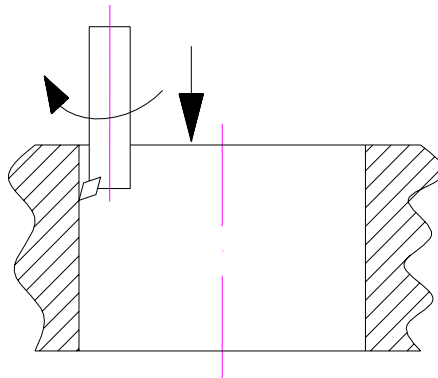
Este processo se assemelha ao torneamento interno, porém é destinado a usinagem de desbaste ou acabamento de furos já existentes (Weingaertner, 2002).

No mandrilamento, a ferramenta executa um movimento de rotação principal e o movimento de avanço é realizado segundo o sentido do eixo de rotação.

2.3.1 Particularidades do processo de mandrilamento

Nesta operação a ferramenta de corte é fixa em uma barra de mandrilar, com um ângulo determinado pela operação a ser realizada. O mandrilamento ocorre com a rotação da barra de mandrilar, e o sentido de avanço do corte se dá no eixo paralelo ao eixo da ferramenta, ficando a profundidade do corte dada pelo deslocamento da ferramenta em relação ao furo. Este processo realizado no torno, ocorre exatamente ao contrário, a peça rotaciona, enquanto a ferramenta fica parada.

FIGURA 5 – Representação do mandrilamento de furos



O mandrilamento é realizado em máquinas chamadas de mandriladoras, que são máquinas especiais, as quais permitem a adaptação de diferentes tipos de ferramentas. Com o acoplamento de acessórios apropriados, a mandriladora pode realizar as operações de furar, de fresar e de rosquear.

Hoje tem-se ferramentas de mandrilar que possuem suportes para realização de acabamento em furos, com altíssima precisão, chamados de barras de mandrilar. Possuem pastilhas intercambiáveis e sistemas de regulação micrométricos para dar a profundidade da ferramenta na peça, e isso faz com que se consiga melhores condições de acabamento e cilindricidade.

2.3.2 Classificação das ferramentas de mandrilar

As ferramentas de mandrilar são classificadas segundo o diâmetro que vai ser submetido ao processo de usinagem.

Os mandris dependem dos diâmetros dos furos, pois são regulados pela barra de mandrilar que é acoplada a máquina.

Os cabeçotes de mandrilar possuem sistemas de regulação de excentricidade da ferramenta. Segundo o princípio de funcionamento, eles podem ser divididos em dois grupos principais: regulação somente pelo movimento da cápsula da ferramenta e do seu suporte; e regulação pelo movimento de uma haste, onde é fixada a cápsula da ferramenta (Weingaertner apud Buck, 1974).

2.3.3 Aplicação do processo de mandrilamento

O processo de mandrilamento é frequentemente adotado para a usinagem final de furos com tolerâncias muito estreitas de diâmetro, de forma (circularidade) e de qualidade superficial. Neste processo, o diâmetro do furo é ajustado através do controle da distância da ponta da ferramenta em relação ao eixo do fuso. A sua vantagem, é que durante a usinagem, além da rotação do fuso, existe apenas um movimento axial de avanço, em um único eixo. Desta forma, há possibilidade de manter tolerâncias muito estreitas de forma. A desvantagem é que o desgaste da ferramenta precisa ser corrigido por um ajuste radial executado manualmente (Gabor, 1982).

2.3.4 Seleção dos mandriladores

As ferramentas de mandrilar são selecionadas conforme o acabamento a ser realizado no diâmetro. Abaixo alguns exemplos de barras de mandrilar.

FIGURA 6 – Ferramentas de mandrilar com cápsula e micrômetro



Fonte: Catálogo de ferramentas Romi

2.4 ALARGAMENTO

O alargamento é um processo de usinagem complementar também conhecido por calibração e tem por objetivo dar acabamento e precisão de circularidade ao furo.

Esta operação é utilizada para melhorar a qualidade dos furos, devido às imperfeições que ocorrem na execução dos mesmos e isso acontece devido ao balanço existente na broca, que acarreta em um aumento no diâmetro. O alargamento é utilizado para furos que exigem rigoroso acabamento e que permitem ajustes de eixos, pinos, buchas, mancais, etc.

2.4.1 Particularidades do processo de alargamento

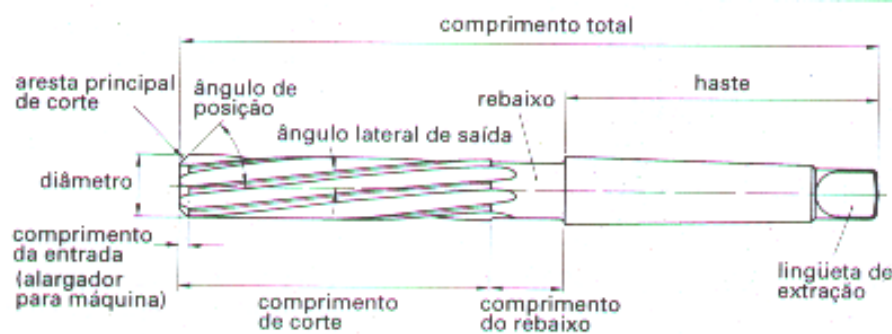
Essa operação exige pré-furo, com diâmetro um pouco menor que o final, de até 0,02 mm, para a realização do alargamento. O cavaco produzido pelo alargamento é muito pequeno, pois é uma operação para acabamento e precisão do furo. Esta operação pode ser realizada pelo processo manual ou em série.

A dimensão da seção transversal do furo é definida pela dimensão da seção transversal do alargador. O processo de alargamento é freqüentemente utilizado no campo de diâmetros abaixo de 20 mm. Acima desta faixa, os processos de mandrilamento passam a ser mais competitivos.

A operação de alargamento é definida, segundo König, apud DIN 8589, como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar para produzir pequenas espessuras de cavacos e criar superfícies internas com alta qualidade dimensional e de forma (Ferraresi, 1970).

O alargamento é realizado por uma ferramenta multicortante chamada de alargador. Um alargador é formado de corpo e haste, conforme figura 7.

FIGURA 7 - Alargador helicoidal com haste cônica



Fonte: Livro Ferramentas de Corte II – Stemmer - 1992 pg 56

2.4.2 Classificação dos alargadores

Os alargadores são classificados segundo as suas características. A haste tem uma cabeça chamada de espiga que se prende ao desandador para trabalhos manuais. O corpo possui navalhas, de formatos retos ou helicoidais, responsáveis pelo corte do material. A parte cortante é temperada, revenida e retificada.

Segundo König, apud DIN 8589, os alargadores são divididos em: alargadores multicortantes e alargadores de corte único. Os alargadores multicortantes possuem lâminas que estão dispostas em um único conjunto e encontram-se simultaneamente em contato com a peça. A usinagem é subdividida em duas operações: corte nas arestas principais e alisamento nas arestas laterais. Estas últimas influenciam mais fortemente no resultado da usinagem.

Em geral, os alargadores multicortantes têm número de arestas par e sua distribuição não é uniforme, para reduzir vibrações auto-excitadas (Metals Handbook, 1989). Se um alargador tem arestas demais, ele não possuirá espaço suficiente para a saída do cavaco. Por outro lado, se ele tem poucas arestas, poderá induzir vibrações, principalmente se for um alargador de canal reto. A vida deste tipo de alargador é determinada pelo aumento da rugosidade, acima do limite permissível, ou por ter atingido a tolerância de diâmetro mais baixa (Ferraresi, 1970).

2.4.3 Aplicação dos alargadores

Os alargadores requerem menor tenacidade do que as brocas, em virtude da carga imposta sobre a ferramenta no alargamento ser normalmente menor do que na furação. Em contrapartida, os alargadores de aço rápido devem ser de elevada dureza (65 HRC ou superior), para se otimizar o acabamento da superfície e a vida da ferramenta. Embora mais caro do que o aço rápido, o metal duro freqüentemente oferece uma vida pelo menos dez vezes mais longa, quando se realiza o alargamento de aços com dureza próxima de 260 HV. Para operações de alargamento de aços com dureza superior a 400 HV, os alargadores de metal duro são os mais recomendados (Metals Handbook, 1989).

O acabamento do furo alargado depende da dureza da peça, das condições das arestas de corte do alargador, do avanço e da velocidade de corte. O alargamento combinado com a operação de pré-furação, produz um acabamento na faixa de IT6 a IT7 (Weinert, 1998). Dentro das condições ótimas, é possível se obter superfícies com rugosidade (R_a) em torno de 1 μm ou menor, para o ferro fundido nodular GGG40 utilizando ferramentas monocortantes de PCBN (Silva et al, 2001).

2.4.4 Seleção dos alargadores

O resultado desta operação depende de vários fatores de extrema importância, quando da determinação da construção da ferramenta: aplicação manual ou mecânica, tipo, profundidade e qualidade do furo (furo passante ou cego, espessura da parede da peça a ser usinada, furo interrompido, estado do furo pré-trabalhado, etc), acabamento da superfície, dimensões e tolerâncias do furo, resistência e usinabilidade do material (Gabor, 1982).

2.5 BRUNIMENTO

O brunimento é um processo de usinagem por abrasão para acabamento superficial. É realizado em superfícies com textura especial que exigem um excelente acabamento e uma baixa rugosidade. Devido à grande necessidade de alto acabamento

em superfícies de furos com grandes diâmetros, é um processo muito utilizado, principalmente em blocos de motores, alojamento de êmbolos hidráulicos, canos de canhão, etc.

2.5.1 Particularidades do processo de brunimento

É um método que emprega ferramentas abrasivas, de grãos finos ligados, para a melhoria da forma e da superfície, sendo que há um contato constante da superfície da peça e da ferramenta.

No brunimento, o brunidor é constituído de segmentos de material abrasivo, montados em grupo. Desloca-se ao longo da geratriz da superfície de revolução, com movimentos alternativos de pouca amplitude, e frequência relativamente grande. O brunidor realiza um movimento vertical oscilante de subir e descer.

A diferença de brunimento e retificação consiste na velocidade de rotação, que é bem menor e a pressão é maior.

O brunimento por ser realizado por ferramentas abrasivas que se deslocam em movimento vertical e rotativo, produzindo um melhor acabamento.

2.5.2 Classificação dos brunidores

Os brunidores são classificados conforme o tamanho dos grãos abrasivos que compõem o brunidor. Como uma operação de acabamento, que proporciona à peça um elevado grau de acabamento, o brunidor deve ser composto por grãos muito finos. Isso independe do diâmetro a ser brunido, pois a regulagem da máquina será feita em função deste diâmetro.

2.6 RETIFICAÇÃO CILINDRICA INTERNA

A retificação também é um processo de usinagem por abrasão, para acabamento superficial. É realizada em superfícies que exigem um excelente acabamento e uma baixa rugosidade superficial. É um processo que também emprega ferramentas abrasivas.

A retificação é muito utilizada para correção de deformidades, ocasionadas por tratamento térmico, e para dar acabamento a peças que sofreram têmpera, revenimento e recozimento.

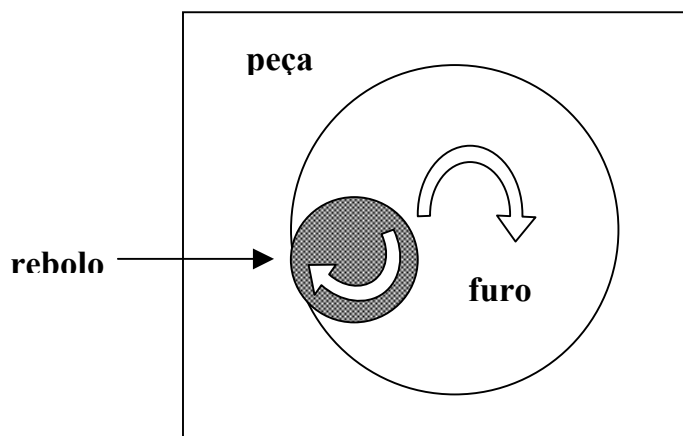
Neste processo a ferramenta a ser utilizada, composta de grãos abrasivos, é chamada de rebolo.

2.6.1 Particularidades do processo de retificação

A retificação ocorre posteriormente a um processo de desbaste. Neste processo, o sobre-metal que deve ser deixado é de 0,2 a 0,5 mm, é uma operação que exige o pré-furo para realizar o acabamento.

A retificação cilíndrica é o processo de retificação tangencial, no qual a superfície usinada é uma superfície cilíndrica. Esta superfície pode ser externa ou interna, de revolução ou não. Quanto ao avanço automático da ferramenta ou da peça, a retificação cilíndrica pode ser com avanço longitudinal da peça, com avanço radial do rebolo, com avanço circular do rebolo (figura abaixo), ou com avanço longitudinal do rebolo (Ferraresi, 1970).

FIGURA 8 – Retificação cilíndrica interna de furos



Fonte: Fundamentos da Usinagem - Ferraresi, 1970 introdução fig 74.

Para retificação de furos de grandes diâmetros, tem-se a Retificadora Plana Vertical, na qual deve ser acoplado o rebolo de diâmetro igual ao raio do furo a que deve ser realizado o acabamento.

2.6.2 Classificação dos rebolos

Os rebolos são ferramentas empregadas para a usinagem com arestas não definidos, e estão subdivididos em quatro grupos principais:

- **Rebolo de material abrasivo ligado,**
- **Rebolsos com revestimentos adiamantados de nitreto de boro cúbico,**
- **Ferramentas com abrasivo aplicado sobre um substrato,**
- **Grãos abrasivos soltos**

Os rebolos mais comuns são os de material abrasivo ligado, de acordo com König, apud DIN 69111, e englobam rebolos planos, cônicos e com pescoço, disco de corte e rebolos fixados em disco de suporte, rebolos em forma de prato, em forma de disco, em forma de copo, segmentos de rebolos, bastões de rebolos, régua de brunimento, blocos de afiação, bem como papel de lixa.

2.6.3 Aplicação do processo de retificação

Este processo como citado anteriormente, é aplicado em peças com elevada dureza, para obter superfícies com baixa rugosidade e boas condições dimensionais, assim deve-se relacionar a profundidade e o tamanho do grão, para obter a rugosidade exigida.

TABELA 2 – Relação de rugosidade com a prof. e granulação

Rugosidade	12,5µm	6,35µm	0,8µm
Granulação	40 a 60	80 a 100	200 a 300
Profundidade	10 a 30µm	5 a 15µm	1 a 8µm

Fonte: König, 1981 pg 389

2.6.4 Seleção dos rebolos

Os rebolos são selecionados segundo o material e o acabamento solicitado para o mesmo. Quanto maior o grau de acabamento necessário à peça, menor são os grãos que compõem o rebolo. Os grãos abrasivos podem ser: naturais, aluminosos e siliciosos.

2.7 BROCHAMENTO

O brochamento é um processo único, no que diz respeito a sua cinemática e geometria. É uma operação que consiste na usinagem linear e progressiva da superfície de uma peça, mediante uma sucessão ordenada de arestas de corte (Ferraresi, 1974).

Neste processo tem-se a realização de uma usinagem utilizando uma ferramenta com múltiplos dentes, que executa a operação em uma única passada.

Este processo é considerado uma usinagem de curta duração, e a ferramenta para realizar o processo é projetada especialmente para aquela operação, ou seja, é uma ferramenta dedicada.

O brochamento deve ser realizado para um lote de peças grandes, peças seriadas, que possa compensar o investimento da ferramenta.

A máquina também é dedicada e deve ser projetada com uma estrutura robusta, sendo conhecida como brochadeira. As ferramentas são conhecidas como brochas, e podem ser:

- a. De compressão: São empurradas através do furo, geralmente são curtas para minimizar a flambagem;
- b. De tração: São puxadas através da peça. São mais extensas e assim tem um maior número de dentes. Isto possibilita a execução, em apenas um passe, operações de desbaste e acabamento. Geralmente utilizadas no brochamento interno;
- c. Rotativas: São empregadas na usinagem de superfícies helicoidais, encontradas em ranhuras internas, raiais para canos de armas e engrenagens helicoidais.

Os dentes múltiplos da ferramenta estão ordenados em seqüência, de forma que o dente sucessivo está localizado num plano um pouco mais elevado que o anterior, obtendo assim o avanço do processo (König, 1981).

Este processo compete diretamente com o fresamento e o mandrilamento (Degarmo, 2000). O brochamento interno exige pré-furo.

A principal vantagem deste processo é a alta remoção de cavaco. Com a retirada de uma pequena quantidade de cavaco por dente, e como durante o processo tem-se

mais de um dente em ação, então isso faz com que a qualidade deste processo possa chegar a valores de acabamento superficial da ordem de IT7 ou melhor (König, 1981).

A ferramenta de brochamento é subdividida em três partes: desbaste, acabamento e calibração. Os comprimentos possíveis das brochas estão situados na faixa de $L = 100 \text{ mm}$ até 2 m , e para ferramentas internas pode ser trabalhado um diâmetro de até aproximadamente $D = 500 \text{ mm}$ (König, 1981).

A velocidade de corte deste processo é dada pelo deslocamento da descida da ferramenta. O avanço é o espaço entre os dentes, e a profundidade de corte é a diferença de altura entre um dente e outro.

2.8 PROCESSOS DE USINAGEM NÃO CONVENCIONAIS

2.8.1 Eletroerosão a fio

Este processo teve seu início com algumas limitações em 1968, mas em 1975 popularizou-se rapidamente na indústria, e em 1982 tinha-se uma estimativa de 1500 máquinas em uso nos Estados Unidos.

É o processo de remoção de material por meio de descargas elétricas e tem as melhores condições de realizar formas irregulares de peças. Este processo não gera grandes distorções na peça e não causa elevadas alterações na microestrutura.

A ferramenta é conhecida como eletrodo, e é muito utilizado em ferramentarias para realizar peças como: placas de guia, porta-punções, guias que são partes dos moldes e matrizes. (McGeough, 1988).

O processo de eletroerosão é conhecido como: EDM (Electrical Discharge Machinig).

Os fios de cobre ou latão têm o diâmetro que pode variar de $0,05$ a $0,25 \text{ mm}$, e a superfície final pode ter um acabamento superficial entre 1 a $5 \mu\text{m}$ em R_a (Ahmed, 1987).

Este processo é considerado como lento (100 m/hora em aço de espessura 25mm), e a superfície final pode chegar a ter uma rugosidade entre $0,12$ a $0,25 \mu\text{m}$. É possível realizar a erosão de uma peça de 200 mm de espessura, levando em

consideração os parâmetros: diâmetro do arame e potência da máquina. (Benedict,1987)

Durante o processo, ocorre uma rápida dissipação de calor devido ao líquido dielétrico, (não condutor de calor), que não influencia na composição da área de corte.

Com a transformação das máquinas utilizando o CNC, tem-se uma obtenção de limites estreitos de tolerâncias do processo.

2.8.2 Corte a jato d'água com abrasivo

Ainda tem-se alguns processos não convencionais para a realização de furos, como por exemplo: o corte por jato d' água, que foi desenvolvido para cortar materiais porosos, como madeira, papel e pedra. Porém, com os bons resultados obtidos em 1980, BHRA Fluid Engineering anunciou o sucesso no desenvolvimento do corte de aços (Benedict,1987).

Esse processo requer grandes instalações, pois a água utilizada deve ser tratada, e necessita de grandes bombas para gerar a pressão necessária para o corte, além disso, é um processo com elevado grau de ruído.

O processo utiliza uma alta pressão de 200 MPa e uma alta velocidade de corte, sem adicionar abrasivos. Temos também o jato d'água com a combinação de partículas abrasivas, com pressão de 400 MPa e com uma alta velocidade de 915 m/seg. Esse processo tem condições de cortar vários materiais, como metal, pedra, vidro, cerâmica e compósitos, com alta velocidade, e dependendo do material pode atingir a espessura de 20 cm (Benedict,1987)

Esse método é utilizado para cortar linearmente e realizar furos de pequeno diâmetro. Possui o injetor de 0,075 mm a 0,635 mm. (Benedict,1987)

2.8.3 Corte Plasma

Um gás usualmente consiste de moléculas, e é composto de dois ou mais átomos. Quando a temperatura do gás é aquecida, e atinge 2000 °C, as moléculas se dissociam e os átomos são separados. Isto ocasiona um aquecimento futuro, de aproximadamente 3000 °C, e alguns átomos têm dispersão de elétrons, iniciando a

ionização, que é eletricamente carregada. O gás nestas condições é conhecido como PLASMA.

Este processo foi reconhecido em 1950, como um processo alternativo de oxigás, para cortar aço inoxidável, alumínio e outros metais não ferrosos. Neste método usa-se um eletrodo de tungstênio como cátodo e um anodo de cobre. O gás passa pelo cátodo onde gera uma reação, e a tocha pode chegar a 33000 °C (Benedict, 1987).

É considerado o quarto estado da matéria. Em 1955, foi cortado alumínio e aço inoxidável, entretanto somente em 1970, quando obteve maior qualidade no processo, foi industrializado. Estimava-se que até 1985 haveriam 8000 máquinas instaladas no mundo (Hypertherm, Inc. 1978).

A pressão do gás em torno de 1,4 MPa resulta em uma boa temperatura. Existem alguns tipos de plasma no mercado: “air plasma”, “dual plasma”, “oxygen-injected”, e “water-injected plasma”.

Dependendo do material e das condições do mesmo, o corte por plasma pode chegar a ser realizado em chapas de metal de 150 mm, mas os mais comuns são em chapas de 3 a 75mm. O acabamento pode chegar de 5,0 a 7,5 μm e com tolerâncias de $\pm 0,8$ mm.

Existe um processo de plasma que utiliza uma película protetora de água no bocal do injetor para que se consiga manter e reter o calor do processo.

A espessura do material depende da taxa de velocidade do jato de plasma. Com isso, existe a variação da rugosidade da superfície. Neste processo a qualidade dos furos não é fator importante, mas a produtividade tem elevada importância.

Pode-se encontrar máquinas com CNC para este processo, o que faz com que os contornos que realizam possam ser de diferentes perfis.

2.8.4 Corte a Laser

A primeira operação a laser iniciou em 1917, por Albert Einstein, onde ele, hipoteticamente, associou, à energia da luz, uma frequência que poderia ser usada para estimular os elétrons e átomos, emitindo uma luz adicional. Mantendo o processo, com

a amplificação estimulada, obtém-se o LASER (Light Amplification by Stimulation Emission of Radiation).

O corte a laser é caracterizado por um processo não convencional de usinagem, e é muito empregado para abertura de furos em chapas.

Os gases mais comuns para o processo a laser são: o argônio e o oxigênio, que produzem um acabamento superficial aceitável às peças cortadas, porém com algumas restrições de espessuras de chapas e velocidade do corte.

O laser tem como principais vantagens sobre outros processos, a velocidade, o efeito térmico reduzido sobre a peça e a aplicação automatizada. Com isso, tem grande ganho em produtividade, fator importante nesse processo.

O diâmetro do laser pode variar de 0,127 a 1,27 mm. O comprimento do raio com o diâmetro pode chegar a 100:1.

2.9 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE FUROS

A qualidade dos furos está associada ao processo, ao material, à ferramenta e aos parâmetros de corte que são utilizados. Porém, a perfeição na realização de furos é muito difícil, devido aos vários fatores que a influenciam. Temos a situação ideal e a real para realizar a operação, e nem sempre a ideal se aproxima da real.

Para poder obter furos aceitáveis temos as tolerâncias, que se apresentam na forma de: tolerâncias dimensionais e tolerâncias de forma.

As tolerâncias dimensionais estão relacionadas com a medida nominal e a medida real encontrada no furo, as tolerâncias de forma estão relacionadas com a geometria dos furos.

a) Tolerâncias Dimensionais

A tolerância dimensional é a faixa de valores que a medida obtida pode variar da nominal e permanecer aceitável. Os fatores que levam a esta variação são vários, por exemplo: a seleção da máquina que irá realizar a operação, o processo definido para esta operação, os parâmetros adotados nas medidas e as dimensões da peça a ser realizada (Agostinho, 1995).

b) Tolerâncias Geométricas

As peças são compostas de corpos geométricos ligados entre si por superfícies de forma simples. Durante a usinagem, consideram-se também os desvios das formas da superfície real com relação à teórica, sejam eles macro ou microgeométricos, assim como os desvios de posição entre as diversas superfícies entre si (Agostinho, 1995):

Os desvios descritos anteriormente poderão ser classificados em:

b.1) Desvios de forma – definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem.

Podem ser classificados em:

Desvios macrogeométricos – retilineidade, circularidade, cilindridade, planeza, etc.

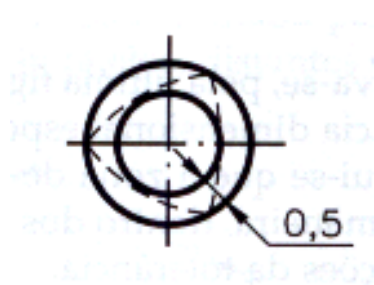
Desvios microgeométricos – rugosidade superficial.

b.2) Desvios de posição – definidos como o grau de variação das diversas superfícies reais entre si, com relação ao seu posicionamento teórico. São as tolerâncias de paralelismo, ângulos, alinhamento, perpendicularismo, simetria e posicionamento (Agostinho, 1995).

Circularidade

A circularidade é uma tolerância de forma macrogeométrica, que tem relação com os diâmetros encontrados na peça quando medida. As diferenças do círculo real para o círculo teórico são genericamente denominadas ovalizações. Tolerância de circularidade é a variação entre duas circunferências do ponto mais afastado do centro, ao ponto mais próximo. O campo de tolerância no plano considerado é limitado por dois círculos concêntricos e distantes de “t” (ABNT, 1976).

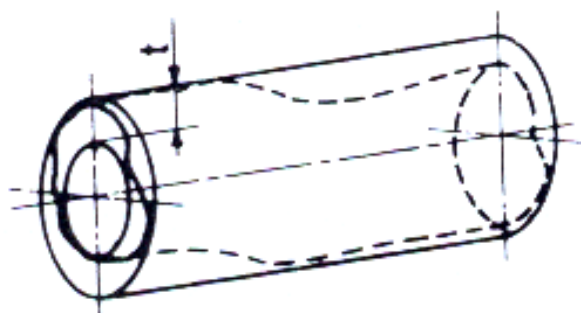
FIGURA 9 – Representação da circularidade



Cilindricidade

A cilindridade também é uma tolerância de forma macrogeométrica, que tem relação com os cilindros coaxiais. A diferença entre estes cilindros coaxiais é a cilindridade. O campo da tolerância de cilindridade é limitado por dois cilindros coaxiais, distantes em “t” (ABNT, 1976).

FIGURA 10 – Representação de cilindridade



Fonte: Norma ABNT NBR 6409 pg 16

Rugosidade

Os processos citados produzem variações nas superfícies de trabalho. Estas variações são muitas vezes imperceptíveis ou invisíveis a olho nu. São cristas e vales que as ferramentas formam, conhecidas como rugosidades. A rugosidade pode ser causada pelas variações no processo, nas vibrações ou por defeitos da peça.

Com base na ABNT NBR 6405, existem alguns itens importantes, na utilização do trabalho.

Rugosidade média (R_a): é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (μm).

Rugosidade máxima ($R_{\text{máx}}$): é o maior valor entre os cinco valores individuais.

Comprimento de onda limite (λ_c) (cut-off): é o comprimento de onda senoidal para o qual o filtro de ondas transmite 75% do valor real da amplitude da ondulação. É dado em milímetros.

No capítulo seguinte, tem-se o estudo sobre o processo de fresamento, o qual pode substituir em alguns casos a furação, em relação à ganhos de produtividade e redução de inventário de ferramentas. O Fresamento Helicoidal Interpolado para furos, devido ao pouco conhecimento que se tem até o momento, foi estudado em sua cinemática e nos detalhes do processo.

CAPÍTULO 3

3.1 ESTUDO DO PROCESSO FHI E PROCESSOS SEMELHANTES

Nesse capítulo, dedicou-se mais atenção ao estudo do processo de fresamento, visando mostrar as qualidades e vantagens que podem ser aplicadas e aproveitadas pelo mesmo, o qual é pouco utilizado para a realização de furos.

A realização de furos de grandes diâmetros em fresadoras convencionais torna-se um processo nada atrativo em relação as furadeiras, devido ao baixo custo das mesmas e as condições de operação serem semelhantes nas fresadoras. Com a evolução das máquinas ferramentas e com o advento da tecnologia das máquinas ou fresadoras CNC, surgiram novos recursos.

A programação de sistemas CNC vem, sendo cada vez mais utilizadas nas máquinas atuais, devido a sua praticidade e aos recursos disponíveis de programação. Esses sistemas oferecem diferentes trajetórias de ferramentas para realização de formas e operações complexas. A interpolação helicoidal é um recurso que pode ser utilizado para a realização de furos em cheio. Nessa condição a ferramenta descreve a trajetória helicoidal.

Visando compreender a cinemática do recurso do Comando Numérico Computadorizado de interpolação helicoidal, procurou-se apresentar a trajetória que a ferramenta descreve durante o processo. Devido à pouca disponibilidade de informações sobre este recurso, fez-se análises comparativas a alguns processos semelhantes para melhorar a interpretação, objetivando a qualidade de furos com grandes diâmetros.

Os processos que podem ser comparados são: roscamento, fresofuração, fresotorneamento e fresomandrillamento. São processos recentes com semelhante descrição cinemática, porém com poucos recursos apresentados em artigos.

3.2 ESTUDO DA CINEMÁTICA DO PROCESSO

3.2.1 Fresamento

Fresamento é um processo de usinagem no qual a remoção de material se realiza de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, geralmente multicortante, gerando superfícies das mais variadas formas (Stemmer, 1992).

Usualmente a peça efetua o movimento de avanço, (na faixa de 10 a 500 mm/min), enquanto que a ferramenta, girando à velocidade relativamente alta (da ordem de 10 a 150 m/min), realiza o movimento de corte, mantendo o eixo de giro numa posição fixa. De modo geral, tanto a peça quanto a ferramenta podem assumir movimentos relativos, independentes ou combinados, permitindo a realização de uma ampla variedade de operações, gerando superfícies planas ou curvas, ranhuras, ressalto, roscas, engrenagens e outras configurações (Stemmer, 1992).

3.2.2 Particularidades do processo de fresamento

No fresamento utiliza-se uma ferramenta chamada fresa, que possui arestas multicortantes com movimento circular para a geração de superfície. O movimento de corte ocorre normal ou oblíquo à direção de rotação da ferramenta.

Fresas são ferramentas rotativas de usinagem, providas usualmente de múltiplas arestas de corte, dispostos simetricamente ao redor de um eixo, removendo intermitentemente material da peça (Stemmer, 1992).

Fresadoras são máquinas-ferramentas construídas especialmente para assegurar os movimentos relativos da peça e da ferramenta, necessários para a efetivação dos processos de fresamento (Stemmer, 1992).

Os processos de fresamento são subdivididos de acordo com König, apud DIN 8589, 1978: conforme a superfície gerada: a forma plana, côncava ou convexa (perfil) e conforme a cinemática.

3.2.3 Classificação das fresas quanto à forma e aplicações

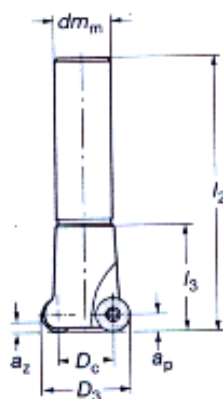
As fresas são classificadas segundo os processos e sistemas de realização da usinagem. Para este trabalho, tem-se o interesse de conhecer melhor a fresa para faceamento, conhecida como fresa de topo toroidal que utiliza pastilhas redondas.

As facetas na base da pastilha proporcionam uma localização perfeita da mesma e previne o seu movimento durante o corte (catálogo Sandvik, 1999).

No fresamento de desbaste em 3 eixos, as fresas de topo toroidal são alternativas para os casos em que a ponta da ferramenta não deva manter-se em contato no corte, para a fabricação de cantos de raios menores que provocam uma alta solicitação da quina da ferramenta (Gomes, 2001).

A ferramenta toroidal utilizada foi uma ferramenta para alto avanço e aplicação exigente, com passo extrafino normal, e três pastilhas de corte redonda de diâmetros de 10 mm. O diâmetro máximo recomendado pelo fabricante para esta ferramenta realizar a interpolação helicoidal é de 38 mm, devido ao acúmulo de cavacos e aos movimentos. Essa ferramenta é recomendada para faceamento, furação e desbaste.

FIGURA 11 – Fresa de Topo Toroidal



Fonte: Catálogo de Ferramentas, Sandvik, 2001, p A62

3.2.4 Aplicações do processo de fresamento

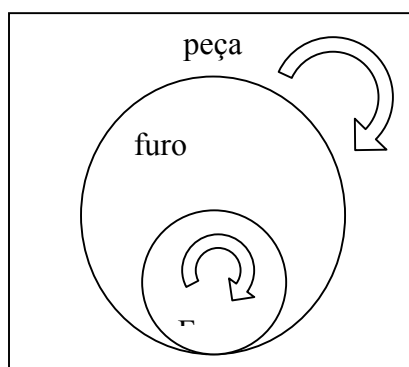
A aplicação do processo de fresamento é muito ampla, podendo realizar fresamento de desbaste em superfícies planas até o fresamento de acabamento de superfícies complexas.

O fresamento, segundo o método, pode ser: concordante e discordante, o que muitas vezes influencia no acabamento final da peça.

Fresamento Concordante: os movimentos da ferramenta e da peça têm o mesmo sentido, onde o corte inicia com a espessura máxima do cavaco e diminui até um valor zero. Neste caso não existe o problema do grande atrito inicial da aresta cortante (Ferraresi, 1974).

A figura 12 mostra o processo de fresamento pelo sistema concordante na peça plana e na realização do processo por interpolação helicoidal na execução do furo.

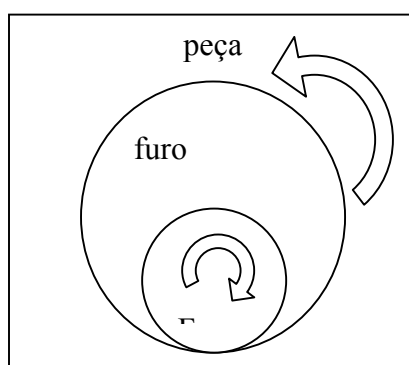
FIGURA 12 - Fresamento concordante



Fresamento Discordante: os movimentos da ferramenta e da peça têm os sentidos contrários, onde o corte inicia com a espessura mínima do cavaco. A espessura do cavaco aumenta de zero a um valor máximo. Inicialmente há um grande atrito entre a ferramenta e a peça. Quando a pressão da aresta cortante atinge um valor capaz de vencer a elasticidade do material, a mesma penetra na peça, e com a composição dos movimentos de corte e avanço, a aresta cortante retira uma porção de cavaco em forma de vírgula (Ferraresi, 1974).

A figura 13 mostra o processo de fresamento pelo sistema discordante na peça plana e na realização do processo por interpolação helicoidal na execução do furo.

FIGURA 13 – fresamento discordante



3.2.5 Fresamento Helicoidal Interpolado

O sistema de fresamento convencional é utilizado para abrir furos de grandes diâmetros com fresas do mesmo diâmetro. Pode-se utilizar fresas de aço-rápido ou cabeçote fresador com pastilhas intercambiáveis. Nesse processo a ferramenta realiza o movimento de rotação e o avanço no sentido paralelo ao eixo de giro da ferramenta. Os movimentos são os mesmos realizados pelo método de furação, apenas a ferramenta é diferente. O acabamento superficial das paredes do furo não tem uma boa qualidade. O que é melhor no fresamento é a garantia de circularidade, garantida pela haste das fresas serem menores que as hastes das brocas, causando uma deflexão menor da ferramenta.

O fresamento convencional e a furação são semelhantes em relação às limitações dos tamanhos das ferramentas para realização dos furos e à necessidade de adquirir várias ferramentas para diâmetros diferentes. No fresamento convencional bem como na furação o deslocamento da mesa é realizado manualmente, o que ocasiona imperfeições no furo.

Para fresamento de roscas, tem-se uma operação semelhante à interpolação, utilizando um dispositivo rígido de fixação e suporte da peça e da ferramenta, realizando-se a rosca externa ou interna de maneira a descrever uma hélice. Este processo requer um dispositivo específico para a operação e é pouco realizado dentro das empresas.

As máquinas com comando CNC possibilitam alguns recursos melhores para a realização de trabalhos de usinagem para furos com grandes diâmetros, que é por exemplo: o recurso da interpolação helicoidal.

Com este recurso tem-se o movimento sincronizado dos eixos de deslocamento e profundidade de penetração da ferramenta. Em algumas máquinas têm-se o deslocamento da mesa nos eixos X e Y, para dar o movimento de avanço radial e o de profundidade da ferramenta no eixo Z. Em máquinas mais robustas, a ferramenta faz o movimento de rotação e avanço axial ao mesmo tempo, ficando a peça parada.

O avanço por rotação é determinante para a rugosidade em quaisquer casos. A solução para se obter uma boa superfície é evidentemente reduzir esse avanço. Mas

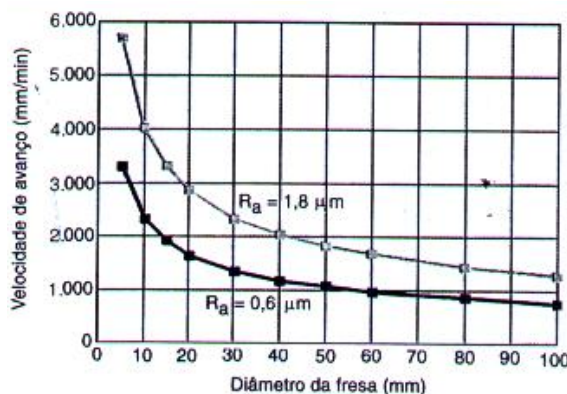
isso seria feito conforme a produtividade. Para conciliar os dois objetivos, talvez seja possível encontrar um caminho melhor, pela escolha adequada de ferramentas e de condições de corte.

Chansel (2000), descreve que no fresamento combinado para obter as menores rugosidades ($R_a < 1,6 \mu\text{m}$), é preferível executar o acabamento de duas superfícies separadamente, em relação ao tempo de operação. O tipo de operação também deve ser considerado. Para a superfície superior, geralmente as rugosidades são menores se o fresamento for do tipo discordante, bem como nas superfícies laterais dos aços e ferros fundidos.

Além disso, na usinagem de contornos é inútil usar ferramentas com diâmetros maiores. Ao contrário, deve-se usar uma fresa de diâmetro pequeno. No avanço por rotação equivalente, ela produz uma velocidade de avanço maior e, portanto, uma melhor produtividade, observação feita por Chansel, 2000.

Pode-se observar isso no gráfico apresentado abaixo, à medida que o diâmetro da ferramenta diminui e a velocidade de avanço aumenta, tem-se uma rugosidade menor.

FIGURA 14 – Representação Velocidade de avanço x diâmetro da fresa



Fonte – Revista MM nº419, dez. 2000, figura 03 p 31

Porém, o principal quesito para a escolha da ferramenta, no final, sempre recai na questão do custo. Para uma mesma rugosidade, o tempo de corte e o custo/hora da máquina vão determinar se é rentável optar pelas ferramentas (Chansel, 2000).

O processo de fresamento combinado pode ser realizado em superfícies planas verticais e horizontais, superfícies côncavas e convexas, também conhecidas como

superfícies complexas, onde as máquinas equipadas com sistema CNC realizam esse tipo de usinagem auxiliada por sistemas CAM (Computer Aided Manufacturing). Estes sistemas possuem condições de realizar a interpolação helicoidal.

É um método de usinagem muito pouco utilizado para realização de operações nas empresas, muitas vezes devido à falta de conhecimento dos operadores. É um sistema que utiliza um ciclo fixo e uma programação simples e fácil.

Pode-se verificar que o tamanho do programa gerado na máquina é pequeno, em relação ao programa realizado pelo sistema CAM, pois o sistema CAM faz uma programação ponto a ponto. Cada mudança de plano em X, Y e Z ele gera um bloco de linhas. No ciclo fixo, pode-se constatar que a cada variação da profundidade de corte a máquina gera uma nova linha e retorna ao início do ciclo até concluir toda a profundidade programada.

Abaixo, um exemplo de um dos programas com ciclo fixo de roscamento, utilizando interpolação helicoidal para realização de um furo em programação ISO, linguagem utilizada na máquina Discovery 4022 com comando Mach 9, na segunda etapa deste trabalho.

;fresamento de furos

G99

G90

G71

G17

G66

GZO

T1 M06

O1 S1591 M3

M8

G0 X32.5 Y94.5

G0 Z3.5

G1 Z3.0 F800

G22 Z-30.0 I37.5 J94.5 K0.5

G0 X37.5 Y94.5

M9

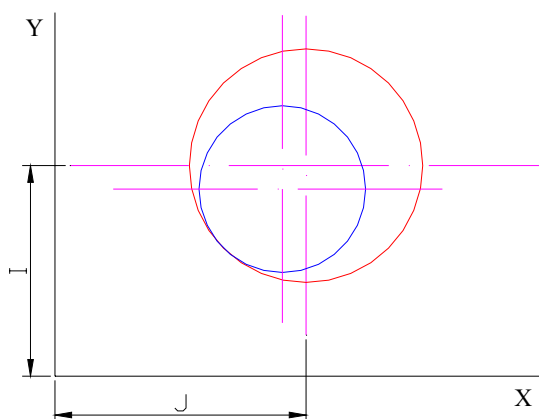
GZO

M5

M2

Com este programa realizou-se a usinagem do furo de forma a descrever o ciclo de rosqueamento da ferramenta. O programa apresenta-se com o cabeçalho inicial, onde os comandos G99, G90, G71, G17, G66, GZO, são os comandos básicos para o início do programa, o comando T1 representa a ferramenta na posição 01 com o M06 sendo a parada do programa para a troca de ferramenta, O1 representa a seleção de corretores e o S1591 representa a rotação a que a ferramenta está submetida em rpm, o M3 é o sentido de giro (horário ou anti-horário) da ferramenta, M8 faz a ligação do fluido de corte, G0 representa a movimentação em vazio da ferramenta (alta velocidade), para a posição X 32,5mm e Y 94,5mm, com o valor de Z3,5mm, assim a ferramenta se aproxima da peça em movimento rápido. A referência do plano é a superfície da peça, por isso o valor de Z é positivo, quando a ferramenta iniciar o corte e efetuar a descida o valor passa a ser negativo. O comando G1 o movimento de trabalho, a partir do Z 3,0 mm com avanço F800 (mm/rpm), na próxima linha o comando G22 realiza a interpolação helicoidal até a altura Z de -30 mm, o valor I 37,5 mm é o valor do centro do furo em relação ao eixo X, e o valor J 94,5mm é o valor em relação ao eixo Y, o valor K0,5 mm é o valor da profundidade de corte que a ferramenta desce em Z, após uma volta completa no furo, até a profundidade de 30 mm, a ferramenta desloca-se para a posição X 37,5 mm e Y 94,5 mm em velocidade de trabalho, o M9 desliga o fluido refrigerante e a ferramenta desloca-se para o centro do furo e para a posição zero em alta velocidade, com o comando GZO, M5 realiza a parada do eixo árvore e M2 indica o fim do programa.

FIGURA 15 – Representação dos componentes I e J do programa CNC

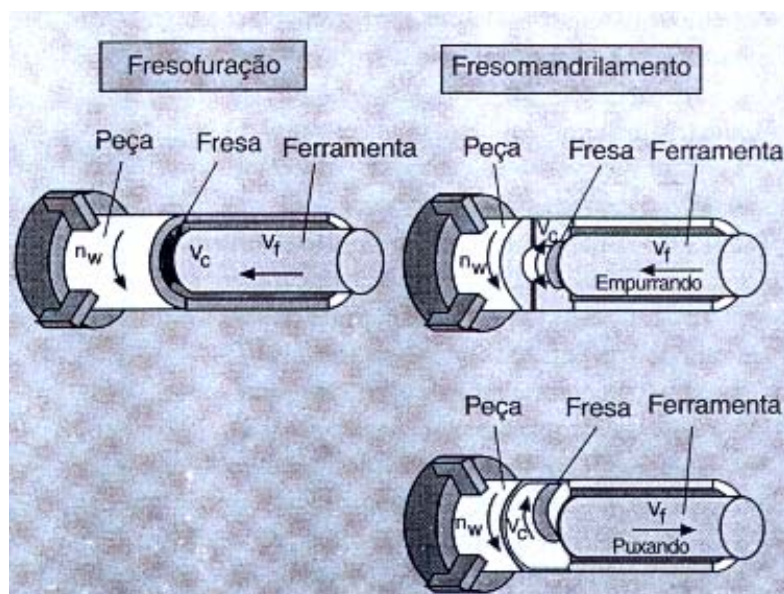


O processo de fresamento por interpolação helicoidal é pouco conhecido e se têm poucas informações sobre o estudo da cinemática deste processo. Com isso fez-se um estudo levando em consideração alguns processos que se assemelham, como: o fresofuração, o fresotorneamento, o fresamento circular.

A fresofuração define a combinação dos processos de usinagem por fresamento circular interno e furação. É empregada na indústria para desbaste de furos em forjados grandes, como uma alternativa econômica para furação em centros de usinagem. Este processo de corte é caracterizado por pequenas fresas que podem ser removidas facilmente mesmo fora do fundo do furo, um pré-requisito importante para a usinagem automatizada. A ferramenta desenvolvida para a fresofuração permite a usinagem de furos profundos com contornos complexos e relação comprimento/diâmetro $L/D = 10$. A manufatura de furos com contornos internos em material maciço requer, um número considerável de brocas convencionais, ferramentas de mandrilar e ferramentas internas guiadas. Normalmente, a usinagem automática é desfavorecida pela formação de cavacos contínuos na maioria dos tipos de aço e ligas de alumínio (Heisel, 1998).

Na ferramenta de fresofuração o avanço helicoidal da fresa é composto do avanço axial da barra da ferramenta, enquanto o avanço circular resulta em rotação da posição excêntrica da fresa (Heisel, 1998).

FIGURA 16 – Representação do fresofuração e fresomandrillamento

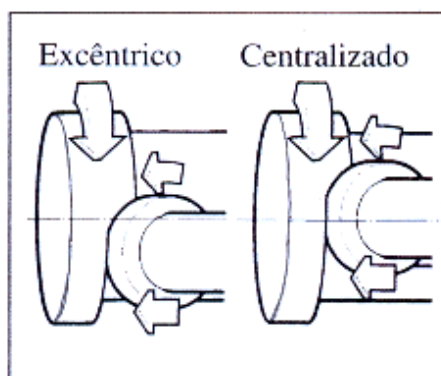


Fonte: Revista MM nº389, junho 1998 pg 17

O Fresotorneamento é a combinação do processo de torneamento e fresamento, mais aplicado a usinagem de virabrequim. Este processo é caro e inflexível, trazendo consigo problemas de custos e velocidade do processo (Correa, 2001). No fresotorneamento, a peça e a ferramenta são providas de movimentos de rotação, sendo que, as elevadas velocidades de corte possíveis são alcançadas pelas altíssimas rotações fornecidas pelo cabeçote fresador (Correa apud Lehmann, 1991).

A figura abaixo mostra o fresotorneamento ortogonal, onde a ferramenta descreve uma hélice no seu traçado, muito próximo ao realizado na interpolação helicoidal, onde a peça realiza um giro e a ferramenta também gira, porém os sentidos de deslocamento são diferentes e a ferramenta está na posição ortogonal à peça.

FIGURA 17 – Representação do processo de fresotorneamento

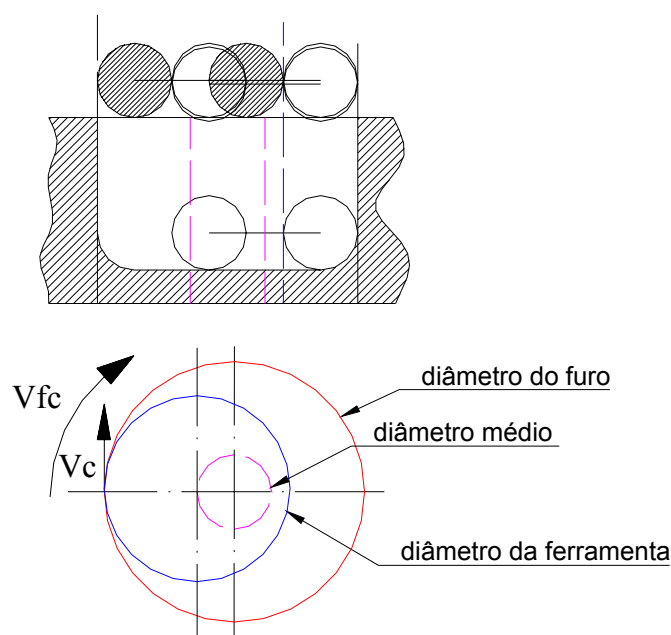


Fonte: O Mundo da Usinagem, abril, 2001 pg 07

Weikert, 2002 relata que o fresamento circular (FC) pode ser usado como alternativa ao mandrilamento, mas exige movimentos em dois eixos simultâneos. Por isso, as tolerâncias de forma e de diâmetro geralmente ficam acima do mandrilamento.

Na interpolação helicoidal, a ferramenta descreve o movimento rotativo principal, e o movimento de avanço é realizado segundo o deslocamento de uma hélice, onde o movimento radial é a amplitude maior da ferramenta, para poder executar diâmetros maiores. Com isso, a ferramenta trabalha excêntrica ao furo, ora na posição de X, ora na posição de Y.

FIGURA 18 – Representação da ferramenta na realização do furo



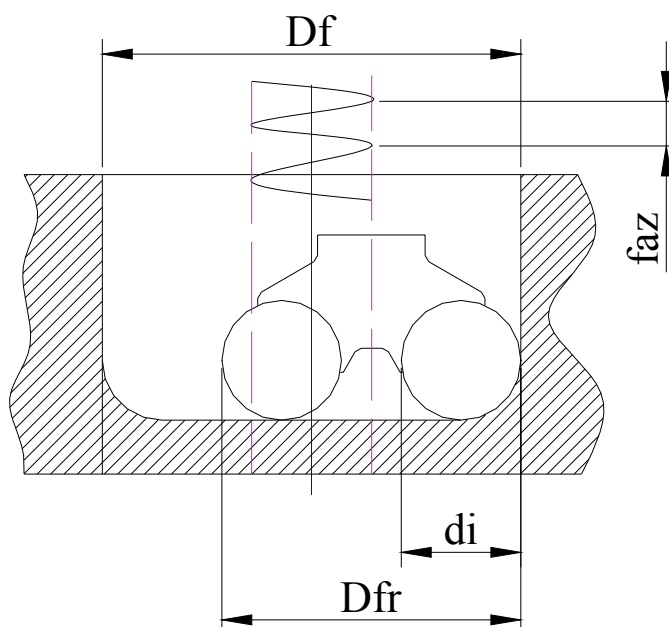
A mesa faz o movimento circular pelo movimento simultâneo dos eixos X e Y. O movimento no eixo Z feito pela ferramenta é o movimento de avanço axial.

O movimento da mesa simultâneo em X e Y pode causar deformações no furo, devido à inércia que a massa da mesa e da peça transferem aos eixos de deslocamento. Os eixos são rotacionados pelos servos motores e fazem o controle do movimento. Os motores devem ter um excelente controle e posicionamentos garantidos.

O diâmetro médio representado na figura 18 é o deslocamento do centro da ferramenta, durante o movimento da mesa nos eixos X e Y.

O processo é semelhante ao roscamento interno, conforme o deslocamento da ferramenta, descreve uma hélice no interior do furo. Na figura abaixo se encontra uma ilustração do movimento que a partir do centro a ferramenta ira descrever.

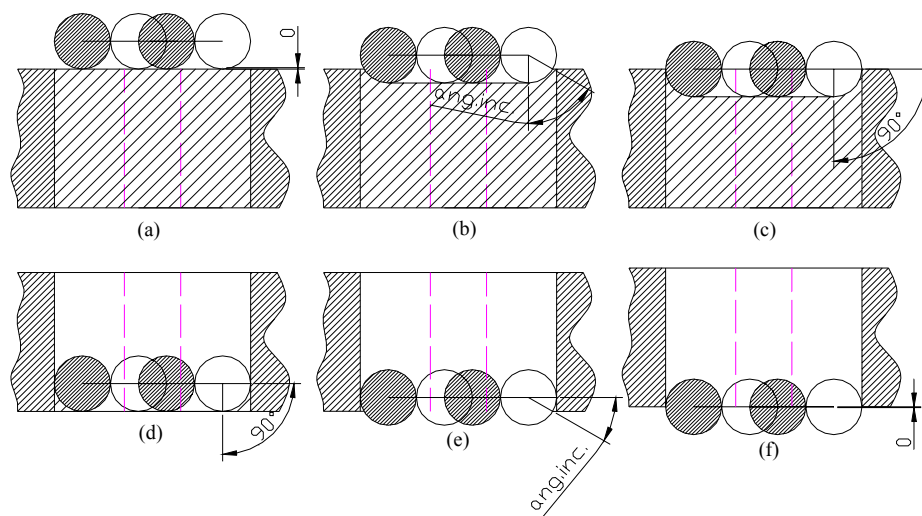
FIGURA 19 – Representação do processo de Interpolação Helicoidal



Na figura 19 pode-se observar que o deslocamento do avanço axial (f_{az}), ocorre para cada volta da mesa, que corresponde ao deslocamento da ferramenta no eixo Z.

Na figura 20 tem-se a representação do ângulo de incidência da ferramenta com a parede do furo a ser realizado. Este ângulo gerado pelo movimento axial da ferramenta, tem a variação entre 0 a 90°.

FIGURA 20 – Representação do ângulo de incidência da ferramenta na entrada e saída do furo



Na representação da figura tem-se:

- a) quando a ferramenta toca a peça, ângulo 0°
- b) quando a ferramenta está na posição intermediária de penetração, varia até 90°
- c) quando a ferramenta encontra-se na metade de sua atuação, 90°
- d) quando a ferramenta está no início da saída do furo, 90°
- e) quando a ferramenta está na posição intermediária de saída do furo, varia até 0°
- f) quando a ferramenta está na saída do furo, ângulo 0°

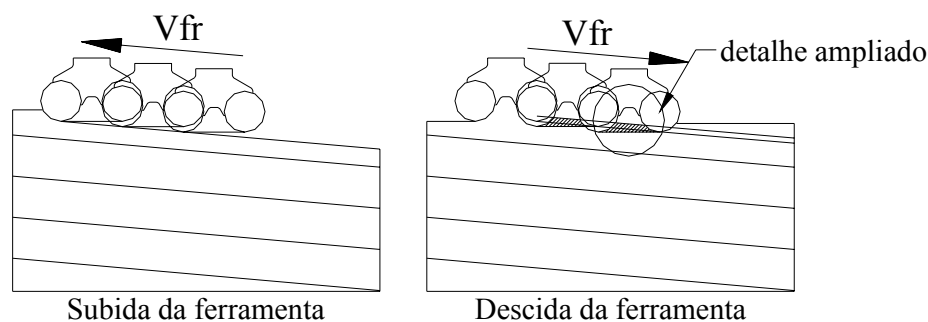
Observa-se que a ferramenta atua em $\frac{1}{4}$ de sua superfície de corte, realizando a operação na parede lateral e na superfície do fundo do furo simultaneamente, o que faz com que se tenha vários planos de trabalho modificando de posição durante o processo.

Além disso, constatou-se a formação de uma superfície no núcleo da ferramenta, como uma “rolha”, que ao movimentar a mesa desloca-se mantendo o material no centro da ferramenta, e ao final da usinagem do furo é cortada com a saída da ferramenta. Na figura representada abaixo, pode-se visualizar que conforme o valor de f_{az} este núcleo é maior ou menor, sendo assim deve-se ter cuidado ao definir o f_{az} para não ocorrer o travamento da ferramenta com o aumento do material da “rolha”. Isso ocorre quando a ferramenta está realizando

o processo de usinagem na descida de um furo ou cavidade. Quando o processo é realizado na subida da superfície, o núcleo da ferramenta não se forma.

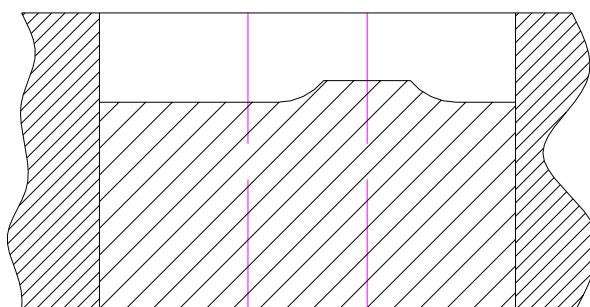
Nos desenhos abaixo pode-se verificar estas situações.

FIGURA 21 – Representação da ferramenta na subida e na descida



Na figura 22 pode ser visualizado este núcleo de uma forma ampliada.

FIGURA 22 – Representação do material no núcleo da ferramenta



Além disso, para melhor compreender este processo de usinagem, deve-se conhecer algumas definições, que estão relacionadas abaixo, segundo ABNT NBR 6162, 1989.

Movimento efetivo – movimento entre aresta de corte e a peça, do qual resulta o processo de usinagem. Ele é, geralmente, resultante dos movimentos de corte e de avanço.

Movimento de corte – movimento entre a aresta de corte e a peça, o qual sem o movimento de avanço, origina somente uma única remoção de cavaco, durante uma rotação ou um curso.

Movimento de avanço – movimento entre a aresta de corte e a peça que, juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua ou repetida de cavaco, durante várias rotações ou cursos.

Velocidade de corte v_c – velocidade instantânea no movimento de corte, no ponto de corte escolhido.

Velocidade de avanço v_f – velocidade instantânea do movimento de avanço, no ponto de corte escolhido.

Componentes dos movimentos, direções, velocidade e percursos.

Componentes relativos à ferramenta ou a peça, com movimentos rotativos.

Componentes axiais – a

Componentes radiais – r

Componentes circulares – c

Exemplo – velocidade de avanço axial – v_{fa}

velocidade de avanço radial – v_{fr}

Conceitos auxiliares:

Ângulo da direção de avanço φ – ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte. O ângulo da direção de avanço para o fresamento é variável, durante o processo de usinagem.

Ângulo da direção efetiva η – ângulo entre a direção efetiva e a direção de corte.

Plano de trabalho P_{fe} – plano imaginário que contém as direções de corte e avanço, passando pelo ponto de corte escolhido. Neste plano se realizam os movimentos que tomam parte na formação do cavaco. Existe sempre um só plano de trabalho, mesmo quando o movimento de avanço seja composto de vários componentes, pois instantaneamente existe uma única direção de avanço.

Grandeza de avanço – as grandezas de avanço resultam de percursos de avanço, relativos à rotação ou ao curso.

Avanço f – avanço por rotação ou curso, medido no plano de trabalho.

Avanço por dente f_z – percurso de avanço por dente ou aresta de corte, medido no plano de trabalho. O avanço por dente é, conseqüentemente, a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida na direção de avanço.

$$f_z = f / z$$

onde: z = é o número de dentes ou arestas de corte

Avanço de corte f_c – distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção de corte.

$$f_c = f_z \sin \varphi$$

Avanço efetivo f_e – distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção efetiva.

$$f_e = f_z \sin (\varphi - \eta)$$

Em muitos casos, a relação v_f/v_c é tão pequena que o ângulo η pode ser desprezado, resultando em:

$$f_e = f_z \sin \varphi = f_c$$

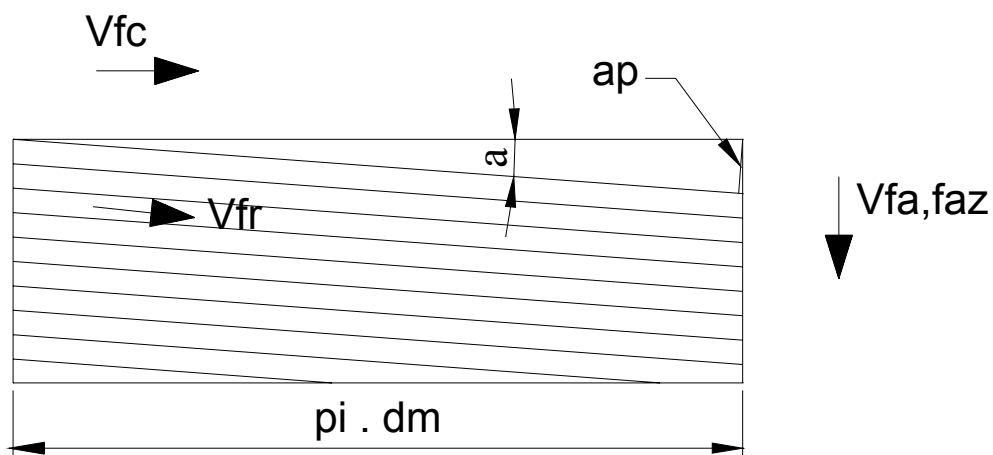
Profundidade ou largura de usinagem a_p – profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicular ao plano de trabalho.

Penetração de trabalho a_e – grandeza de penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço.

Penetração de avanço a_f – grandeza de penetração da ferramenta medida na direção de avanço.

Após as definições necessárias, para elucidar o estudo do deslocamento da ferramenta, fez-se uma planificação no diâmetro do furo e representou-se na figura abaixo:

FIGURA 23 – Representação gráfica do movimento da ferramenta



v_{fc} = velocidade de avanço circular

v_{fa} = velocidade de avanço axial
 v_{fr} = velocidade de avanço resultante
 f_{az} = avanço axial
 d_m = diâmetro médio do percurso da ferramenta

Nesta figura, as informações na forma geométrica e em parâmetros de corte relacionam-se, pois o ângulo de inclinação é o mesmo para a geometria e para os parâmetros de corte. Considerou-se uma posição pontual da ferramenta para análise.

Para análise do tempo de usinagem, tem-se: $\alpha = a$

$$tc = \frac{lf}{vfa} \quad (1)$$

$$tg\alpha = \frac{vfa}{vfc} \quad (2)$$

$$tg\alpha = \frac{faz}{\pi \cdot dm} \quad (3)$$

igualando a equação (2) com a equação (3) tem-se:

$$\frac{vfa}{vfc} = \frac{faz}{\pi \cdot dm} \quad (4)$$

$$vfa = \frac{vfc \cdot faz}{\pi \cdot dm} \quad (5)$$

sendo: $vfc = n \cdot fc \cdot z$ (6) então:

$$vfa = \frac{n \cdot fc \cdot z \cdot faz}{\pi \cdot dm} \quad (7)$$

tem-se que: $dm = D_{furo} - D_{fresa}$ (8) substituindo em (7)

$$vfa = \frac{n \cdot fc \cdot z \cdot faz}{\pi \cdot (Df - Dfr)} \quad (9)$$

substituindo a equação (9) na equação (1) tem-se o tempo de usinagem.

$$tc = \frac{lf \cdot \pi \cdot (Df - Dfr)}{n \cdot fc \cdot z \cdot faz} \quad (10)$$

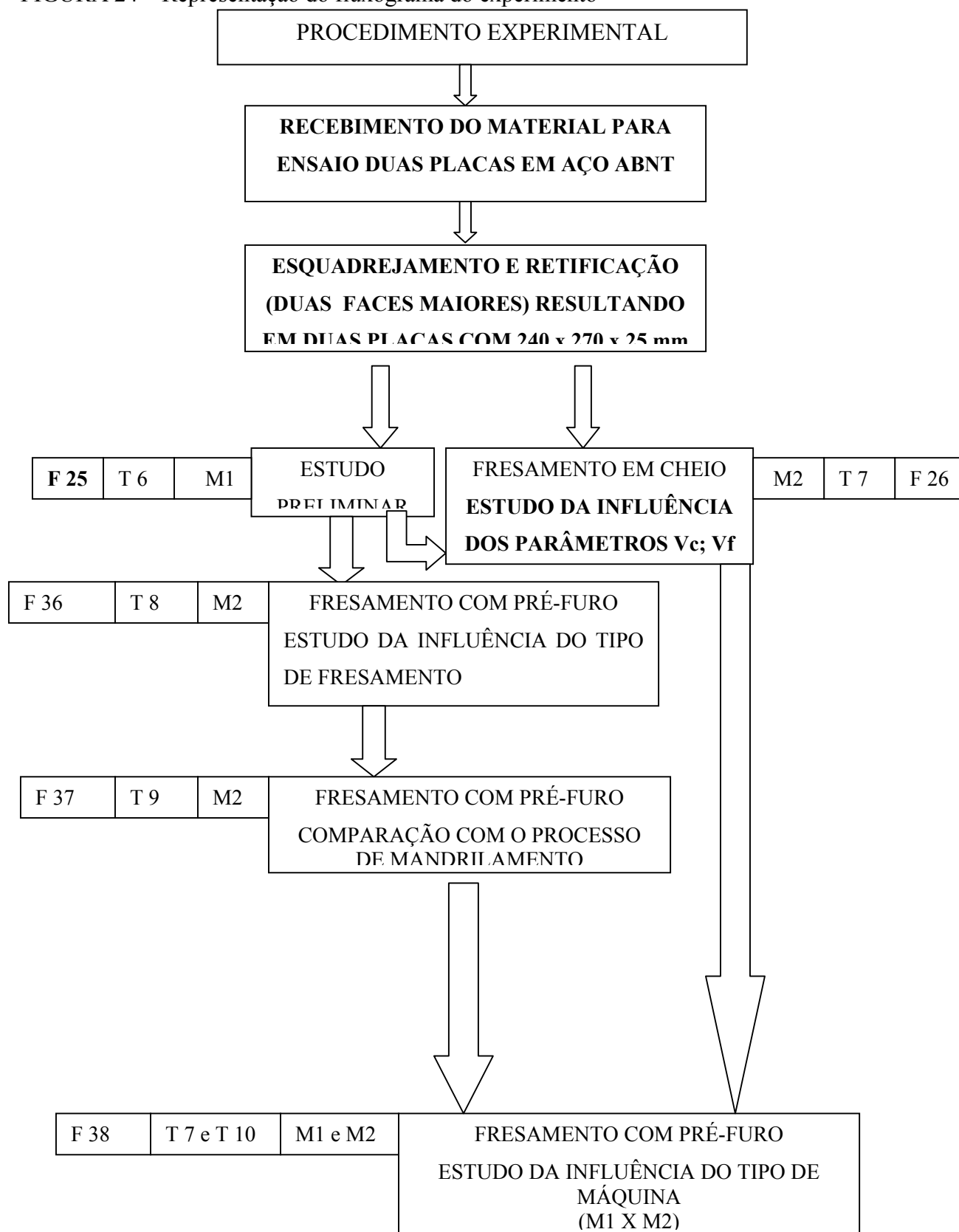
Neste capítulo pode-se verificar o FHI, suas características e as condições que o processo ocorre. Análise dos fatores que podem influenciar e como é realizado o programa para a usinagem por interpolação helicoidal.

No capítulo 04, tem-se a descrição do experimento, os passos realizados os equipamentos e métodos utilizados.

CAPÍTULO 4

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

FIGURA 24 – Representação do fluxograma do experimento



Os experimentos descritos a seguir foram planejados partindo-se da premissa que o processo de fresamento helicoidal interpolado (FHI) é pouco aplicado no meio fabril e os dados encontrados na literatura científica também são escassos. Além disso, como exposto no capítulo 3, a terminologia referente à geometria e cinemática bem como as condições de corte encontradas em catálogos de ferramentas (ver, por exemplo, Dapra, 2001, Kennametal, 2002, Sandvik, 2001 e Seco, 2001) não são uniformes. Dessa forma, optou-se por realizar experimentos para apenas avaliar o efeito de alguns parâmetros de corte sobre a qualidade dos furos obtidos. Sob nenhuma hipótese os valores descritos a seguir devem ser tratados como condição otimizada de corte, mas sim como referência para condições similares às estudadas neste trabalho.

Apesar de haver um certo consenso na literatura (Weikert, 2002) de que o FHI seja recomendado para furos de grandes diâmetros, neste trabalho usinaram-se furos com diâmetros de 35 e 38 mm. Esta faixa foi escolhida com o intuito de reduzir os custos da experimentação e também em função do diâmetro da fresa.

O material dos corpos de prova ensaiados foi o aço ABNT 1045, conforme composição química indicada na tabela 3. Foram utilizadas duas placas nas dimensões de 242 x 272 x 25,4 mm. Estas foram submetidas a um tratamento térmico de normalização, realizado após o corte por plasma, nas seguintes condições: Temp = 600 °C por 6 horas em forno com atmosfera controlada.

Após o recebimento as placas foram fresadas para garantir o esquadrejamento das laterais, ficando ambas com as medidas finais de 240 x 270 mm. As duas superfícies maiores foram retificadas para a dimensão final de 25 mm para propiciar uma melhor referência e fixação durante os ensaios.

Este aço foi selecionado por ser um material muito utilizado na construção de moldes e matrizes para injeção e conformação, o qual é geralmente empregado nas placas bases ou até mesmo nas cavidades. Nesse caso, essas placas recebem furos passantes que funcionam como guias ou alojamentos para as colunas do molde ou da matriz. Além disso, o diâmetro desses furos varia em função das dimensões do molde, o que implica na inviabilidade de se investir em ferramentas dedicadas para sua fabricação.

Geralmente, emprega-se o processo de furação (em uma ou mais etapas) seguido de mandrilamento (em desbaste e acabamento). Estas condições propiciam a avaliação do FHI enquanto processo alternativo.

TABELA 3 – Composição química do aço ABNT 1045

Elem.	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	N	Ti	Nb	V	B	Ca
%	0,43	0,68	0,16	0,07	0,22	0,26	0,01	0,02	0,01	0,51	0,01	0,01	0,02	0,01	0,16

Fonte: Certificado de composição química da corrida nº 165770 fornecido pela COSIPA.

No fluxograma, identificam-se as informações correspondentes: as tabelas pelas letras “T”, as máquinas pela letra “M”, e as figuras pela “F”, relacionando-as a cada etapa do experimento e a numeração de cada um.

As máquinas utilizadas foram centros de usinagem verticais com construções diferentes, denominados aqui de máquina M1 e M2 e representados com dados dispostos nas tabelas 4 e 5 e nas figuras 25 e 26.

TABELA 4 – Informações gerais sobre o centro de usinagem M1.

PARÂMETROS	VALORES
Fabricante	Hermle
Modelo	C 600 U
Curso X, Y, Z [mm]	600, 450, 450
Rotação Máxima [rpm]	16000
Potência disp. eixo árvore [kW]	10 - 25

Fonte: Catálogo do fabricante Hermle

FIGURA 25 – Desenho Esquemático sobre a geometria e cinemática do centro de usinagem M1.

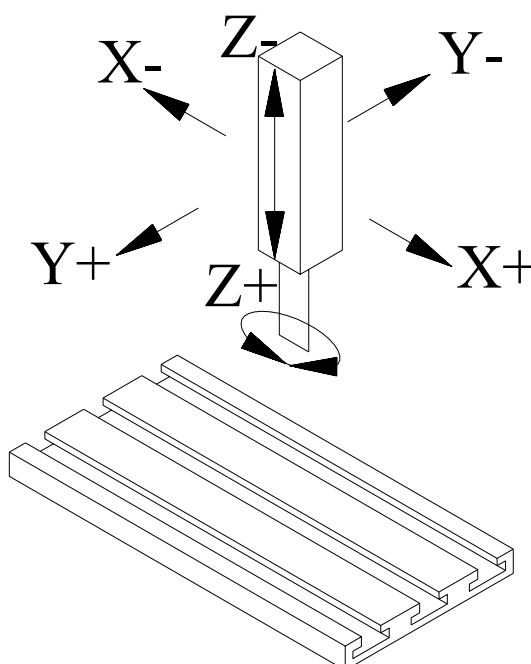
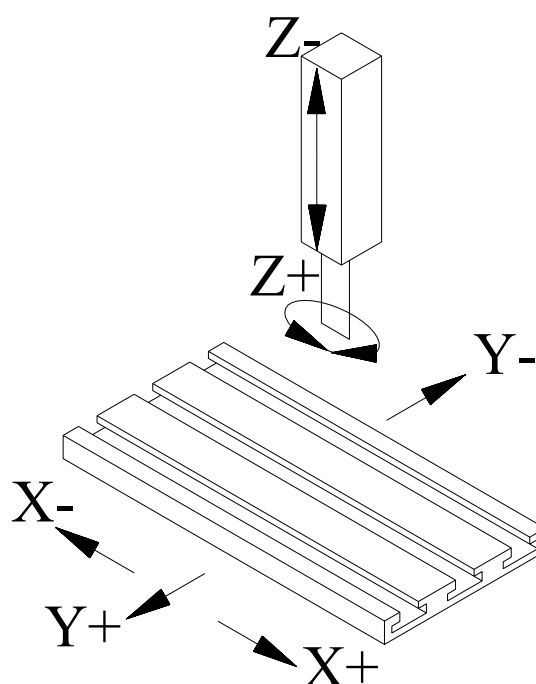


TABELA 5 - Informações gerais sobre o centro de usinagem M2.

PARÂMETROS	VALORES
Fabricante	Romi
Modelo	Discovery 4022
Curso X, Y, Z [mm]	700, 600, 400
Rotação Máxima [rpm]	7500
Potência disp. eixo árvore [kW]	7,5

Fonte: Catálogo do fabricante Romi

FIGURA 26 – Desenho Esquemático sobre a geometria e cinemática do centro de usinagem M2.



A ferramenta utilizada nos ensaios foi uma fresa de topo toroidal de três arestas de corte (ver fig. 11) adquirida da empresa Sandvik Coromant (Sandvik, 2001), conforme código R200-015A20-10H. Escolheu-se insertos intercambiáveis redondos, conforme código ISO RCKT 10 T3. Todos os insertos possuíam quebra cavaco MO-PM, conforme código Sandvik. O material dos insertos foi o metal duro revestido, conforme código Sandvik 4030. Após a realização de dois furos, em qualquer condição ensaiada, trocou-se a gume de corte. Demais informações sobre a geometria da ferramenta e das condições de montagem podem ser vistas figura 27.

FIGURA 27 – Desenho da fixação e parâmetros de montagem da fresa

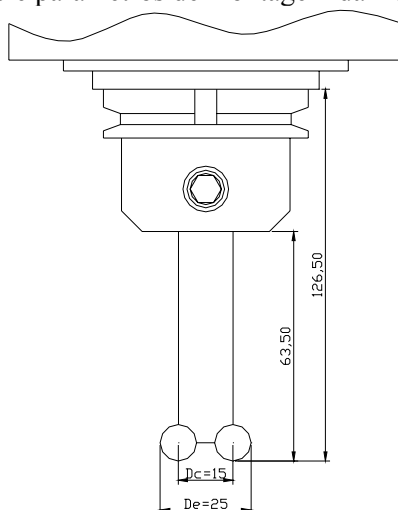
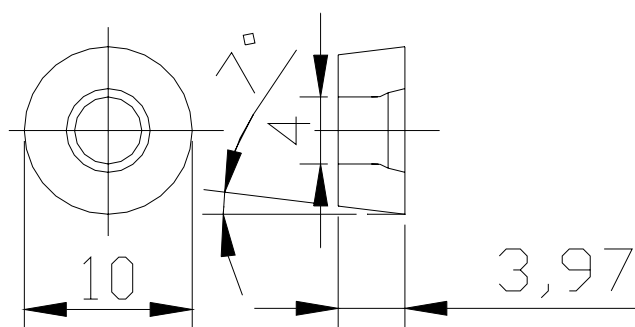


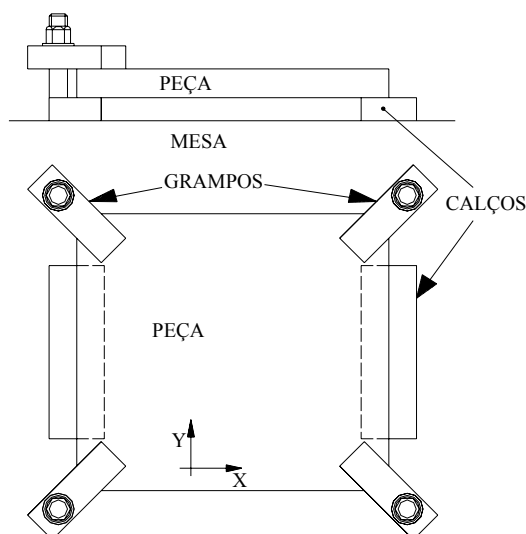
FIGURA 28 – Representação da pastilha de corte



Após as pastilhas estarem montadas no suporte, foram realizadas as medidas de variações radiais e axiais, as quais obtiveram os valores de 0,03 mm para fora e 0,01 mm para dentro.

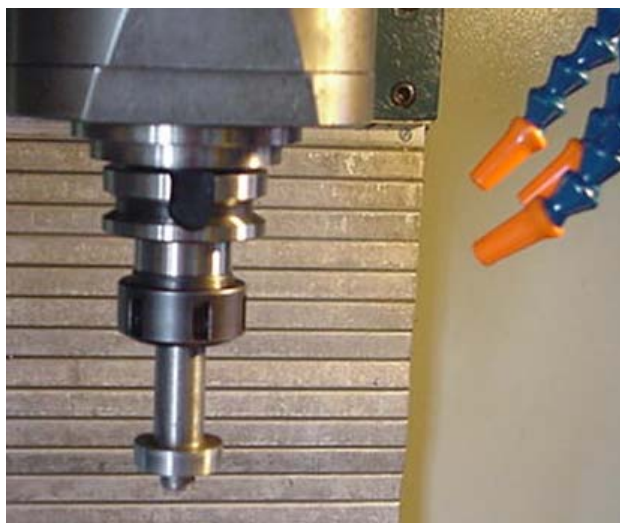
Os corpos de prova foram posicionados e fixados nas mesas das máquinas com auxílio de calços e grampos conforme desenho esquemático mostrado na figura 29. A lateral de 270 mm foi alinhada em relação ao eixo X das máquinas para garantir uma melhor distribuição dos furos.

FIGURA 29 – Desenho esquemático do posicionamento e fixação dos corpos de prova



Em todos os ensaios utilizou-se fluido de corte. O fluido utilizado foi uma emulsão 80% água e 20% óleo (FUCHS – ECOCOOL DURANT 71) distribuído em três bocais alinhados a aproximadamente 45° em relação ao eixo árvore da máquina (ver figura 30).

FIGURA 30 – Representação dos canais de refrigeração



As rugosidades das superfícies usinadas foram avaliadas após cada ensaio via parâmetros R_a e R_{max} em concordância com a norma ISO 4287/1. A rugosidade de cada furo foi tomada pela média de quatro observações eqüidistantes sobre a mesma secção transversal considerada na metade do comprimento do furo, conforme representado na figura 31. O rugosímetro foi posicionado (ver figura 32) em relação aos corpos de prova de forma a garantir que todas as medidas fossem feitas na direção

do avanço axial. Empregou-se um rugosímetro de contato marca Mitutoyo, modelo SJ201 com cut-off 0,8 e 05 mm comprimentos de amostragem com descarte para o primeiro e o último.

A figura mostra a posição onde foi realizada a medição da rugosidade em cada furo, realizando a rotação da peça e medindo os quadrantes dos furos.

FIGURA 31 – Região dos furos escolhida para medida da rugosidade

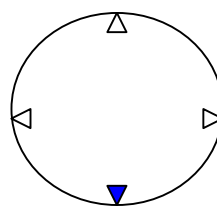


FIGURA 32 – Montagem da bancada para medição da rugosidade



Os desvios de circularidade e cilindridade foram mensurados em uma máquina tridimensional com medição por coordenadas, marca Brown & Sharpe Dea Scirocco com apalpador de ponta esférica em rubi (ϕ 4 mm).

4.2 ESTUDO PRELIMINAR

Nesta primeira etapa fez-se um estudo observacional. Este estudo tem o objetivo de elucidar o processo de FHI, os possíveis problemas que possam ocorrer no

experimento e as condições dos parâmetros de corte com a qualidade dos furos obtidos em cheio. Foram definidos alguns parâmetros de corte segundo o catálogo do fabricante da ferramenta, sem um rigoroso objetivo de qualidade e resultados. Realizaram-se 12 furos para o melhor aproveitamento da placa e maiores combinações dos parâmetros.

Após a definição dos parâmetros de corte, a programação foi gerada por um sistema CAM, partindo do desenho da peça. Foram fornecidas as informações necessárias para a obtenção do programa, como: f_{az} , v_c e o tipo de fresamento. Foi enviado para a máquina, em sequência aleatória dos furos, para evitar ou amenizar uma possível deformação na peça.

4.2.1 Parâmetros de usinagem para o estudo preliminar

Nesta etapa foram definidos parâmetros recomendados segundo o catálogo do fabricante. Utilizou-se a variação do avanço axial (f_{az}), velocidade de corte v_c fixa e o tipo de fresamento (concordante x discordante). Estas variações se deram devido a pouca informação sobre a ferramenta. A tabela abaixo apresenta os valores usados. Para esta etapa foram realizados furos com diâmetro de 35 mm.

TABELA 6 – Parâmetros de corte do estudo preliminar

FURO	V_c (m/min)	Tipo de Fresamento	f_{az} (mm/v)
01	135	concordante	2,0
02	135	concordante	2,0
03	135	concordante	1,0
04	135	discordante	1,0
05	135	discordante	2,0
06	135	concordante	1,0
07	135	discordante	1,0
08	135	concordante	2,0
09	135	concordante	1,0
10	135	discordante	1,0
11	135	concordante	1,0
12	135	discordante	1,0

4.2.2 Realização da usinagem

Nesta primeira etapa realizou-se um processo classificatório, para poder avaliar os parâmetros recomendados pelo catálogo do fabricante da ferramenta.

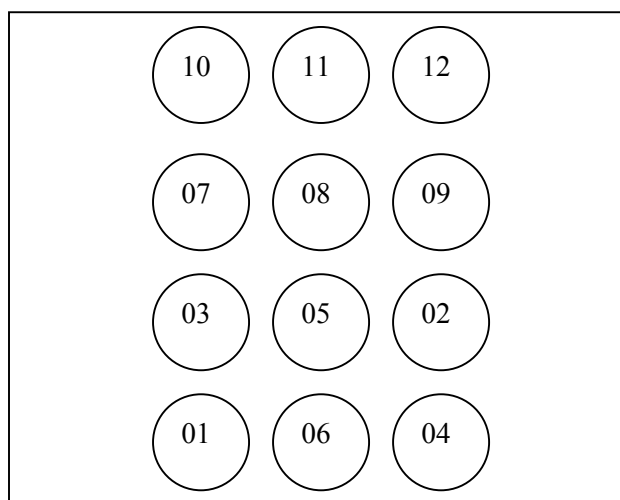
Na figura 29 pode-se visualizar a fixação da peça, com isso tem-se uma melhor distribuição de tensões, o que evita possíveis mascaramento dos dados do experimento. Não é o ideal para efeito de experiência, porém é o método mais utilizado nas ferramentarias e empresas de usinagem.

O programa CAM gerou aproximadamente 3000 linhas para a realização de cada furo, o programa foi enviado para a máquina e devido ao seu tamanho demorou em receber e iniciar o processo. Para este caso, o programa é feito ponto a ponto, por isso o grande número de linhas.

Os furos foram realizados aleatoriamente, como já foi mencionado, além disso, não se pôde comparar os tempos, pois houve uma interrupção para retirada do cavaco, para verificar o seu comportamento.

Na figura 33, pode-se observar a sequência dos furos realizados na máquina M1.

FIGURA 33 – Representação da sequência dos furos na primeira etapa



4.2.3 Análise dimensional

Apoiada a peça sobre três suportes, foi realizado o referenciamento das superfícies lateral e superior. Realizou-se o escaneamento dos furos em três secções: na entrada, no meio e na saída dos furos, em alturas distintas, para análise da cilindricidade e circularidade.

Nesta primeira etapa devido ao grau de acabamento superficial, não foi medida a rugosidade dos furos. Constatou-se que o valor de f_{az} utilizado foi muito alto para o

acabamento desejado. Com isso, concluiu-se o estudo observacional e partiu-se para o estudo dos novos parâmetros de corte, visando uma menor rugosidade.

Na etapa seguinte, realizou-se a usinagem com os novos parâmetros estudados e definidos, dentro de um projeto de experimento fatorial 2^3 .

4.3 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS v_c , v_{fc} e f_{az}

Para esta etapa, foram definidos novos parâmetros, obtidos dos resultados da primeira etapa. Os parâmetros de corte: velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço circular (v_{fc}) e o avanço axial no eixo Z (f_{az}), tem o objetivo de obter melhor acabamento superficial. Levou-se em consideração o estudo estatístico do projeto fatorial 2^K do experimento fatorial para análise dos valores. Definiu-se a usinagem de 8 furos em cheio com os parâmetros de corte variando para cada operação, com diâmetros de 35 mm. Os furos foram realizados aleatoriamente para evitar ou amenizar a influência das tensões na placa durante o processo.

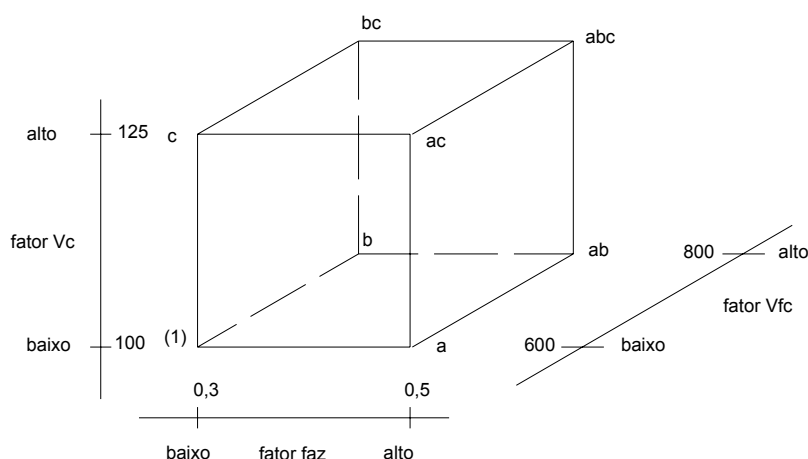
O programa CNC foi gerado em um simulador desenvolvido no VisualBasic para facilitar a programação e evitar a digitação no comando da máquina. O programa utiliza um sistema de ciclo fixo como uma realização de rosca: ciclo de roscamento. O simulador foi desenvolvido para este trabalho e o programa gerado é de poucas linhas, como pôde ser visto no capítulo 3, com as explicações dos elementos.

Analizados os valores obtidos na primeira etapa, chegou-se à conclusão que os melhores resultados obtidos no estudo preliminar foram, no furo 07 e 12, os quais tinham o $f_{az} = 1,0$ mm, sistema discordante.

O estudo estatístico considerou um projeto 2^3 , onde 3 são os fatores, cada um a dois níveis. É chamado projeto experimento fatorial (Nanni, 1992; Snedecor, 1982).

Tem-se oito combinações de tratamento, essas combinações aparecem representadas graficamente por um cubo. Com esta análise pode-se estimar o efeito dos fatores principais v_c , f_{az} e v_{fc} , das interações entre dois fatores $v_c f_{az}$, $v_c v_{fc}$, $f_{az} v_{fc}$ e da interação entre os três fatores, $v_c f_{az} v_{fc}$.

FIGURA 34 – Representação gráfica do tratamento das combinações



Os oito furos com novos parâmetros de corte têm o objetivo de fornecer resultados de qualidade superficial e dimensional desejada. Que na primeira etapa, dentro dos parâmetros do catálogo do fabricante da ferramenta, foi realizado apenas um experimento observacional.

4.3.1 Parâmetros de usinagem da segunda etapa

Com os dados obtidos na primeira etapa, fez-se algumas modificações visando melhorias na superfície. Utilizou-se o $v_{fc} = 600$ e 800 mm/min, foi reduzido o valor de f_{az} para $0,3$ e $0,5$ mm, e as v_c ficaram em 100 e 125 m/min, pelo fresamento discordante.

A tabela abaixo apresenta os novos parâmetros de corte, para cada furo. E estes valores estão levados a dois níveis de análise, onde os valores maiores consideram nível alto e os valores menores relacionados ao nível baixo. Utilizando a expressão 10 do capítulo 03, calculou-se os tempos para o FHI realizado em cheio.

TABELA 7 – Parâmetros de corte para a influência dos parâmetros v_c , v_{fc} e f_{az}

FURO	v_c (m/min)	v_{fc} (mm/min)	f_{az} (mm/v)	Tempos (min)
01	125 (alto)	800 (alto)	0,5 (alto)	2,51
02	100 (baixo)	600 (baixo)	0,3 (baixo)	5,58
03	125	800	0,3	4,19
04	125	600	0,5	3,35
05	100	800	0,5	2,51
06	125	600	0,3	5,58
07	100	600	0,5	3,35
08	100	800	0,3	4,19

Com estes dados, passou-se para a geração da programação CNC de cada furo. Foram gerados todos os programas no simulador e armazenados em disquete. Para fazer a comunicação com a máquina, foi colocado um computador acoplado à mesma e fez-se a transmissão de dados.

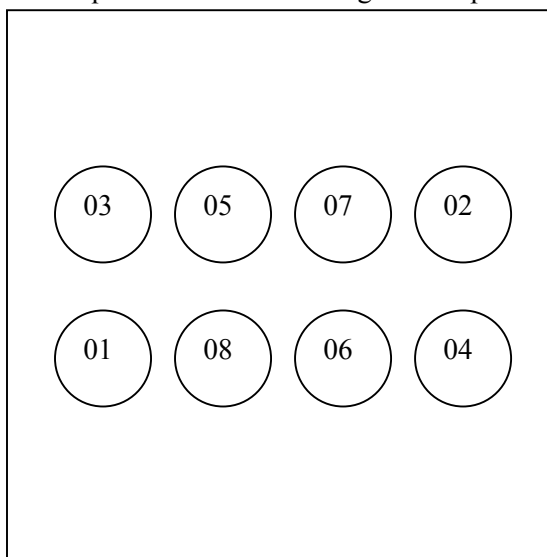
4.3.2 Realização da usinagem

Fez-se a preparação da máquina, com um aquecimento do sistema, conforme orientação do fabricante. A peça retificada é fixa à mesa, sobre dois calços e com relógio apalpador fez-se o alinhamento, conforme figura 29.

Chamou-se o programa na tela da máquina e realizou-se uma operação em vazio para visualizar o processo. Após a visualização, iniciou-se a usinagem com fluido de corte.

Foi realizada a usinagem aleatoriamente, conforme a seqüência da numeração da figura abaixo.

FIGURA 35 – Representação da seqüência dos furos na segunda etapa



4.3.3 Análise dimensional

Ao concluir a furação a peça foi seca, limpa e foi passado óleo para evitar a oxidação. A peça foi encaminhada para o Laboratório de Metrologia, onde se

realizaram as medidas de rugosidade, circularidade e cilindridade utilizando os equipamentos mencionados no início do capítulo.

4.4 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE FRESAMENTO (concordante X discordante)

Nesta terceira etapa o objetivo foi comparar os valores de rugosidade, circularidade e cilindridade, no processo fresamento discordante e concordante de acabamento, realizado por FHI, com pré-furo.

Definiram-se os parâmetros de corte pela análise dos resultados obtidos nas etapas anteriores.

Utilizou-se a mesma peça da primeira etapa, com o mesmo método de fixação da figura 29. Esta etapa realizou-se na máquina M2.

Todos os programas CNC para esta etapa foram gerados no simulador.

Realizou-se três furos, fresados concordante e três discordantes, com diâmetro final de 38 mm, todos com acabamento.

As medições de rugosidade, circularidade e cilindridade foram realizadas com os mesmos equipamentos, nas mesmas condições citadas anteriormente.

4.4.1 Parâmetros para usinagem com pré-furo

Foram realizados seis furos nas condições da tabela abaixo. Utilizou-se a maior velocidade de corte e avanço e o menor valor do avanço axial da segunda etapa.

O fresamento de acabamento foi realizado no sistema discordante e concordante, pois devido à falta de informações, pode-se analisar a influência do tipo de fresamento utilizado.

A tabela 8 se constitui dos parâmetros de corte para a usinagem com pré-furo, os tipos de fresamento e a numeração dos furos para cada condição.

TABELA 8 – Parâmetros de corte para fresamento (discordante x concordante)

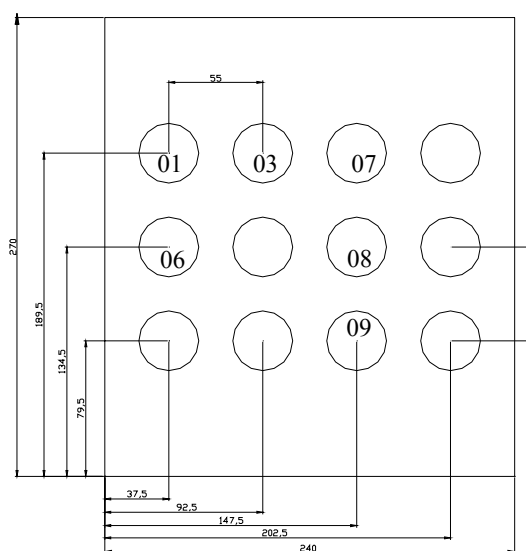
FUROS	v_c (m/min)	v_{fc} (mm/min)	f_{az} (mm/v)	Tipo de fresamento
06,07,09	125	800	0,3	Discordante
01,03,08	125	800	0,3	Concordante

4.4.2 Realização da usinagem

A peça foi fixada na mesa e apoiada sobre calços. Após o alinhamento, programou-se a máquina com o sistema desenvolvido e iniciou-se a usinagem.

Iniciou-se o FHI de acabamento discordante x concordante, conforme parâmetros da tabela 8, e a posição dos furos conforme a figura 36.

FIGURA 36 – Representação da sequência dos furos na terceira etapa



Utilizaram-se as mesmas condições de fluido refrigerante, citada anteriormente.

4.4.3 Análise dimensional

Para os furos deste processo foram utilizados os mesmos métodos e equipamentos citados no início do capítulo.

4.5 FRESAMENTO COM PRÉ-FURO UTILIZANDO MANDRILAMENTO

Realizou-se quatro furos com a barra de mandrilar, Romicon®, para se obter um comparativo entre o processo de acabamento por fresamento e o por mandrilamento.

Os parâmetros de corte foram levantados via catálogo do fabricante, a máquina utilizada foi a M2, nas mesmas condições de refrigeração e fixação descritas anteriormente, foi utilizada a peça da primeira etapa que possui pré-furo.

4.5.1 Parâmetros de usinagem do mandrilamento

Foi realizado o mandrilamento nos furos 04, 10, 11 e 12, com os parâmetros de corte apresentados na tabela abaixo.

TABELA 9 – Parâmetros de corte e tempo para o mandrilamento

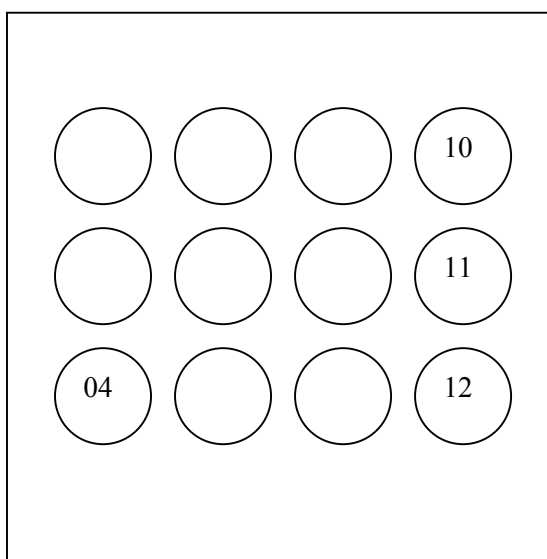
FUROS	n (rpm)	a_p (mm)	f (mm/v)	Tempo (min)
04	1500	0,2	150	0,14
10	1500	0,2	150	0,14
11	1500	0,2	225	0,09
12	1000	0,4	120	0,18

4.5.2 Realização da usinagem

A peça foi fixada sobre a mesa nas condições mencionadas nas etapas anteriores; o refrigerante de corte foi da mesma solução de 1x20; fez-se o alinhamento da peça; gerou-se a programação com o simulador e realizou os quatro furos nas posições, conforme figura 37.

Os furos mandrilados receberam, o avanço radial (a_p) manualmente.

FIGURA 37 – Representação dos furos mandrilados



4.5.3 Análise dimensional

Foram realizadas as avaliações dimensionais e de rugosidade, nas mesmas condições já mencionadas.

4.6 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE MÁQUINA

Nesta etapa, levantou-se o comparativo entre as máquinas M1 e M2, segundo os resultados obtidos da usinagem do fresamento com pré-furo. Como se pôde verificar nas figuras 25 e 26, as máquinas possuem cinemáticas diferentes em relação aos movimentos da ferramenta e da mesa. Com isto, avaliaram-se os valores obtidos.

4.6.1 Parâmetros de usinagem

Foram realizados na máquina M1, 04 furos em cheio com a mesma ferramenta e nas mesmas condições de fixação e refrigeração mencionadas no início do capítulo. Assim pôde-se comparar a influência da cinemática e da estrutura da máquina.

Os parâmetros de corte utilizados para o processo na máquina M1, estão na tabela abaixo.

TABELA 10 - Parâmetros da máquina M1 para a realização dos furos em cheio

Furos	v_c (m/min)	v_{fc} (mm/min)	f_{az} (mm/v)
02	125	800	0,5
03	125	600	0,3
04	125	600	0,5
05	125	800	0,3

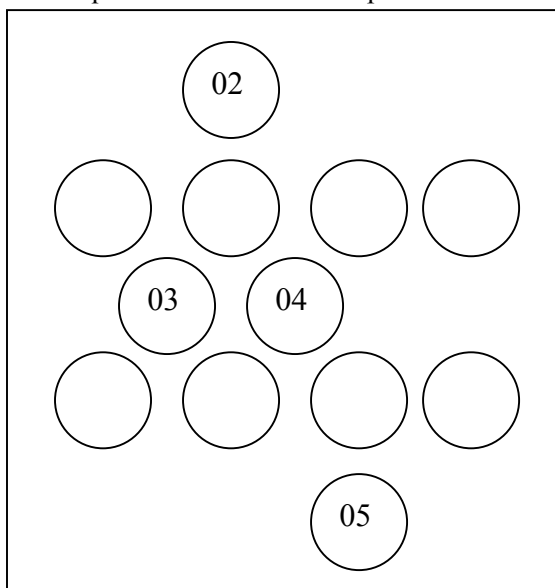
Os valores obtidos com estes parâmetros de corte serão comparados aos valores obtidos a partir da tabela 7.

4.6.2 Realização da usinagem

Nesta etapa, foi utilizada a peça da segunda etapa, com 08 furos. O FHI em cheio deu-se até o diâmetro de 35mm, nas mesmas condições de fixação, refrigeração e com a mesma ferramenta, trocando apenas as pastilhas.

As posições dos furos estão demonstradas na figura abaixo.

FIGURA 38 – Representação da seqüência dos furos na etapa cinco



4.6.3 Análise dimensional

A análise foi realizada nas mesmas condições e com os mesmos equipamentos citados no início deste capítulo.

Com isso, concluiu-se o experimento, partindo-se para a análise dos resultados obtidos. Procurou-se no experimento realizar cada etapa nas mesmas condições para que houvesse uma padronização nos procedimentos de realização e medições, esperando-se com isso obter resultados melhores e mais confiáveis, veremos isso no próximo capítulo.

No capítulo 05 apresentam-se os resultados e as discussões deste trabalho, considerando-se os fatores que podem influenciar na usinagem por FHI e os valores obtidos no experimento.

CAPÍTULO 5

5.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, após o experimento ter sido realizado e com os valores em mãos, partiu-se para a análise e discussões dos resultados. Assim, como já esta sendo proposto, também se dividiu em etapas os resultados.

5.1.1 Estudo Preliminar

Na primeira etapa foi realizado um estudo observacional, para poder avaliar o comportamento do processo de FHI, o acabamento superficial e os valores obtidos.

Observou-se que em todas as condições adotadas a superfície usinada assemelhava-se mais a uma superfície roscada. Foi possível observar, claramente, que as marcas de avanço axial (f_{az}) correspondiam a um suposto “passo de rosca”. Isto pode ser explicado pelos altos valores de avanço axial adotados ($f_{az} = 1$ e 2 mm) em relação ao diâmetro do inserto (10 mm). Essa superfície extremamente rugosa impediu a análise comparativa dos desvios geométricos (circularidade, cilindridade) e da textura (rugosidade).

Apesar disso, foi constatado uma aparência de melhor qualidade para os furos fresados com o menor valor de avanço axial ($f_{az} = 1$ mm). Quanto às diferenças devidas ao tipo de fresamento (concordante x discordante), não foi obtida diferença significativa.

Nessas condições pôde-se constatar que, apesar de uma superfície ruim, a forma do cavaco obtido não comprometeu, em nenhum momento a segurança da operação. Isso não corrobora a observação feita por Weikert e Ritter, 2002. A ferramenta utilizada neste trabalho possui um volume de bolsões suficiente para armazenagem dos cavacos. Além disso, o fluido de corte desempenhou uma função importante de auxiliar a expulsão dos cavacos do fundo do furo. Entretanto, deve-se observar que no referido trabalho, usinou-se furos com diâmetro bem superior ao ensaiado aqui.

Verificou-se a formação de uma extensa rebarba no fundo dos furos, exigindo em todos os experimentos um processo extra para a sua remoção. Em alguns casos, mesmo utilizando um grande percurso de avanço, superior à espessura da chapa, mais o raio do inserto, não foi possível o corte do fundo do furo. Isto implicou na permanência de uma chapa muito fina, de diâmetro igual ao diâmetro do furo, solidária à peça.

A explicação para este fenômeno é baseada na substituição do processo de corte — quando a espessura da chapa torna-se muito fina (na saída do furo) — por um processo de embutimento.

Um fator importante, observado nesses ensaios, foi a necessidade da avaliação dimensional (diâmetro) da ferramenta antes da geração do programa. Nesses estudos preliminares, todos os programas foram gerados a partir da dimensão nominal, informada pelo fabricante, tendo sido registrado apenas os desvios radiais e axiais. As dimensões finais para um suposto furo de diâmetro de 35 mm estão registradas na tabela 11. Verificou-se depois que o diâmetro real da ferramenta era de 24,82 mm e não 25 mm como esperado. Dessa forma, todos os furos foram usinados com um diâmetro inferior a 35mm.

Pela observação da influência do avanço axial na qualidade dos furos, optou-se pela definição de menores valores para os estudos seguintes, embora isso representasse um aumento no tempo de corte.

Na tabela 11 a seguir pode-se observar os valores das dimensões em três posições diferentes dos furos. Tem-se onze medições devido ao fato do primeiro furo ter sido replicado com os mesmos parâmetros de corte.

TABELA 11 – Análise dimensional entre três planos, após o estudo preliminar com $v_c=135\text{m/min}$ e $v_{fc}= 400$ e 600mm/min .

Tipo de Fresamento	faz (mm/v)	ponto 01 (mm)	ponto 02 (mm)	ponto 03 (mm)	média (mm)
discordante	2	34,815	34,756	34,793	34,788
	1	34,838	34,828	34,848	34,838
	1	34,834	34,839	34,826	34,833
	1	34,795	34,804	34,792	34,797
	1	34,798	34,793	34,792	34,794
concordante	2	34,820	34,596	34,615	34,677
	1	34,787	34,682	34,692	34,720
	1	34,743	34,720	34,727	34,730
	2	34,737	34,695	34,787	34,740
	1	34,674	34,680	34,680	34,678
	1	34,716	34,698	34,724	34,713

5.1.2 A influência dos parâmetros v_c , v_{fc} e f_{az}

Após a realização de todos os ensaios, conforme metodologia proposta no tópico 4.3, procedeu-se à medição das rugosidades pelos parâmetros R_a e $R_{máx}$. Aplicando os métodos estatísticos propostos, verificou-se resultados diferentes, dependendo do parâmetro escolhido como variável dependente.

Isso pode ser explicado pela diferença na definição de ambos. Enquanto o R_a é uma medida da média das alturas dos picos e vales em relação a uma linha média; o $R_{máx}$ é um registro pontual da maior altura pico-vale dentro do comprimento amostrado, conforme definido no tópico 2.9 do capítulo 2. Dessa forma, este último torna-se mais sensível a eventuais danos provocados pelos cavacos e às deformações plásticas sofridas pelo material da peça. Ao contrário, nos ensaios com pré-furo (ver tópico 5.1.3), observaram-se valores de $R_{máx}$ mais uniformes, isto é, com menor variação, decorrente de uma menor taxa de remoção acompanhada de um fluxo de cavacos menos intenso.

Os gráficos 2 e 3 mostrados nas páginas 70 e 71, contêm, respectivamente as médias de quatro observações para os parâmetros R_a e $R_{máx}$. Apenas pela análise das figuras, observa-se que o menor valor de rugosidade (R_a) foi registrado para as condições de $v_c = 125 \text{ m/min}$; $V_{fc} = 800 \text{ mm/min}$ e $f_{az} = 0,3 \text{ mm}$. Para a rugosidade

máxima ($R_{\text{máx}}$), entretanto, as condições foram outras. O menor valor de $R_{\text{máx}}$ foi observado em $v_c = 100$ m/min; $v_{fc} = 800$ mm/min e $f_{az} = 0,5$ mm.

A partir da análise da variância (ver tabela 13) verifica-se que nenhum dos três fatores influenciou, significativamente a rugosidade (R_a) (Snedecor, 1982). Entretanto, deve-se observar o seguinte: o experimento realizado é pobre, pois não houve replicações. Isto implicou em realizar um teste de significância com apenas 1 grau de liberdade para o denominador, e tomar os valores de Fischer e a probabilidade como referência. Para as condições experimentadas, o efeito de f_{az} só seria significativo para um nível de confiança abaixo de 94%. A significância da influência da velocidade de corte só pode ser considerada para um nível abaixo de 91% de confiança (ver tabela 14).

Supondo que as replicações nas medidas de rugosidade pudessem ser consideradas como replicações dos ensaios, verifica-se (ver tabela 14) que tanto o avanço axial quanto a velocidade de corte influenciam, significativamente, no resultado do R_a . Entretanto, registra-se que isto é apenas uma simulação, pois as repetições nas medidas de rugosidade não constituem, no sentido físico do termo, replicações dos ensaios.

Realizando-se uma replicação genuína dos ensaios, pode-se supor, e isto é bastante razoável, que para ferramentas novas como as utilizadas aqui, a média dos valores médios das rugosidades (R_a), tenderá a uma variância menor. Isso pode ser explicado pela teoria do valor médio (Snedecor, 1982).

Analizando-se também o gráfico 2, constata-se que, independente dos valores de v_c e v_{fc} , a redução do avanço axial (f_{az}) implicou, sempre, numa redução da rugosidade (R_a). Dessa forma, assume-se que, dentro das condições ensaiadas, o avanço axial influencia na rugosidade da superfície usinada, quando esta foi avaliada pelo parâmetro R_a .

No caso da velocidade de corte, a conclusão não é a mesma. Apesar da independência em relação aos outros fatores, constatada pelo gráfico 2 e pela tabela 14, a diferença só é significativa ao nível abaixo de 91%. Além disso, um fato de suma importância deve ser registrado aqui: quando se variou a velocidade de corte (de 100

para 125 m/min) isto se deveu, somente, à variação da rotação da fresa, o que para uma determinada velocidade de avanço circular preestabelecida, implica numa alteração do avanço circular. Dessa forma, não se pode afirmar a origem das diferenças observadas.

Quanto às interações entre fatores, observa-se que elas não são significativas, porém isto não deve ser entendido como uma conclusão definitiva, mais experimentos fazem-se necessários para que isto possa ser postulado.

Voltando-se à questão do $R_{\text{máx}}$, verifica-se, a partir da tabela 15, que as interações entre v_c - f_{az} e v_c - v_{fc} são bem mais significativas, independente do nível de confiança, que os efeitos dos fatores. Isto também é comprovado pelo gráfico 3. Entretanto, não se pode concluir sobre essas diferenças, pelos motivos já expostos e pela diferença conceitual entre os parâmetros R_a e $R_{\text{máx}}$

TABELA 12 – Resultados da rugosidade R_a na segunda etapa

V_{fc} (B) (mm/min)	V_c (C) (m/min)	f_{az} (A) (mm/v)	média R_a (μm)
600(baixo)	100(baixo)	0,3(baixo)	1,5875
		0,5(alto)	1,9375
	125(alto)	0,3(baixo)	1,125
		0,5(alto)	1,4275
800(alto)	100(baixo)	0,3(baixo)	1,1475
		0,5(alto)	1,895
	125(alto)	0,3(baixo)	1,1025
		0,5(alto)	1,6125

GRÁFICO 2 – Representação da rugosidade R_a x parâmetros de corte

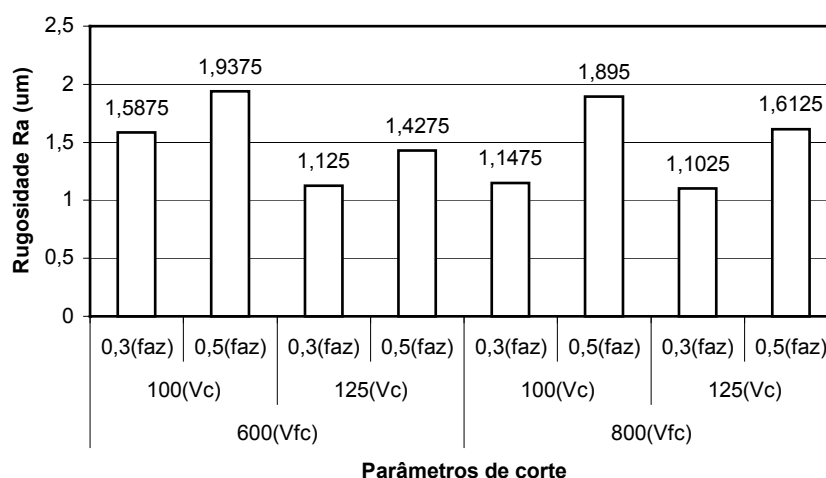
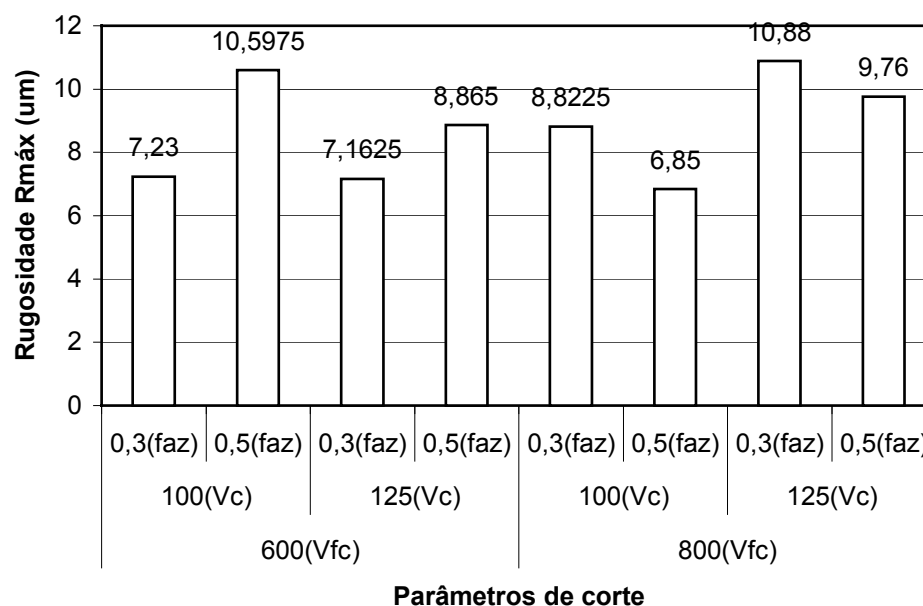


GRÁFICO 3 – Representação da rugosidade $R_{\text{máx}}$ x parâmetros de corte

Observou-se que o melhor valor de $R_a = 1,1025 \mu\text{m}$ é um resultado muito bom no acabamento superficial dos furos fresados em cheio.

TABELA 13 – ANOVA sobre a influência dos fatores f_{az} , v_{fc} e v_c no R_a

FONTE	Efeito	média	GL	média	F	P
faz	0,4775	1,8241	1	1,8241	22,71	0,0001
Vfc	-0,08	0,0512	1	0,0512	0,6375	0,4325
Vc	-0,325	0,8450	1	0,8450	10,521	0,0035
faz * Vfc	0,15125	0,1830	1	0,1830	2,2786	0,1442
faz * Vc	-0,07125	0,0406	1	0,0406	0,5056	0,4839
Vfc * Vc	0,16125	0,2080	1	0,2080	2,5898	0,1206
faz * Vc * Vfc	-0,0475	0,0181	1	0,0181	0,2247	0,6397
erro		1,9277	24	0,0803		

TABELA 14 – ANOVA para o R_a com um grau de liberdade

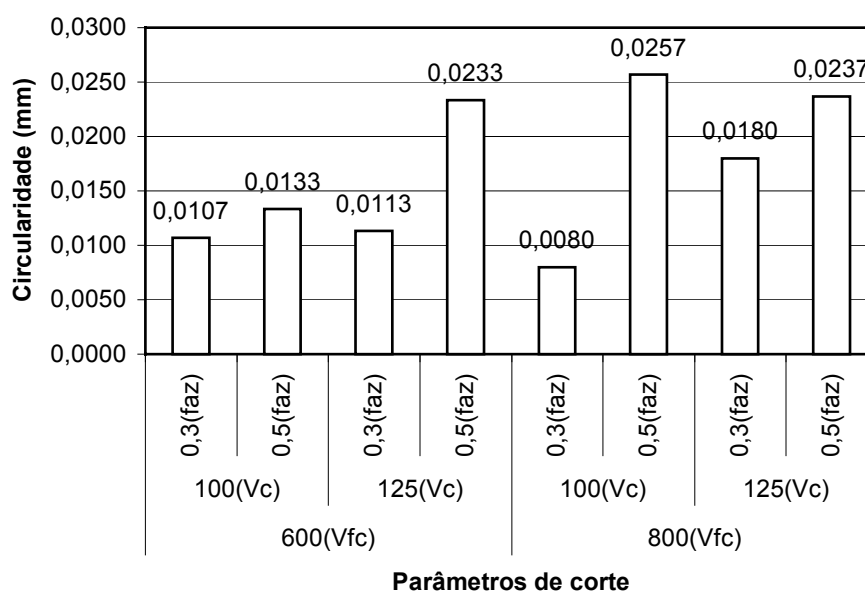
FONTE	Efeito	média	GL	média	F	P
faz	0,4775	0,4560	1	0,4560	101,06	0,0631
Vfc	-0,08	0,0128	1	0,0128	2,84	0,3411
Vc	-0,325	0,2113	1	0,2113	46,81	0,0924
faz * Vfc	0,15125	0,0458	1	0,0458	10,14	0,1937
faz * Vc	-0,07125	0,0102	1	0,0102	2,25	0,3743
Vfc * Vc	0,16125	0,0520	1	0,0520	11,52	0,1824
faz * Vc * Vfc	-0,0475	0,0045	1	0,0045		

TABELA 15 – ANOVA para o R_{\max} com um grau de liberdade

FONTE	média	GL	média	F	P
faz	0,4888	1	0,4888	0,6170	0,5761
Vfc	0,7549	1	0,7549	0,9529	0,5077
Vc	1,2541	1	1,2541	1,5830	0,4275
faz * Vfc	8,3283	1	8,3283	10,5125	0,1905
faz * Vc	0,0825	1	0,0825	0,1042	0,8013
Vfc * Vc	5,7249	1	5,7249	7,2263	0,2267
faz * Vc * Vfc	0,7922	1	0,7922		

Neste gráfico pode-se notar que o melhor valor da circularidade ficou com os parâmetros de $v_{fc} = 800$ mm/min, $f_{az} = 0,3$ mm e $v_c = 100$ m/min, coincidindo os fatores v_{fc} e f_{az} em relação à rugosidade. Apesar de não poder afirmar que existe uma influência significativa na circularidade, os melhores valores foram encontrados com o menor valor de $f_{az} = 0,3$ mm.

GRÁFICO 4 – Representação da circularidade no FHI em cheio

TABELA 16 – ANOVA para a influência dos parâmetros f_{az} , v_{fc} e v_c na circularidade

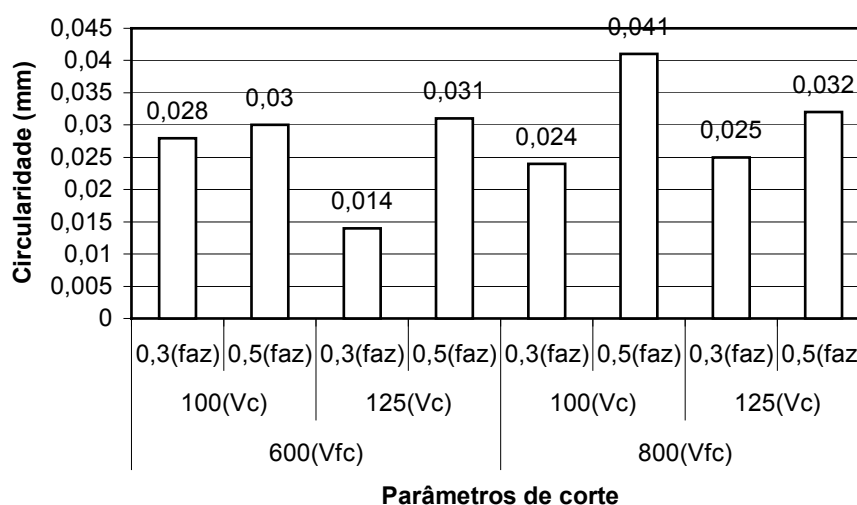
FONTE	média	GL		F	P
faz	0,00018	1	0,00018	3,1709	0,3258
Vfc	3,5E-05	1	3,5E-05	0,6109	0,5776
Vc	4,4E-05	1	4,4E-05	0,7646	0,5426
faz * Vfc	9,4E-06	1	9,4E-06	0,1654	0,7541
faz * Vc	8,8E-07	1	8,8E-07	0,0155	0,9211
Vfc * Vc	8,8E-07	1	8,8E-07	0,0155	0,9211
faz * Vc * Vfc	5,7E-05	1	5,7E-05		

Obteve-se o melhor valor de cilindridade com os parâmetros de corte $f_{az} = 0,3$ mm, $v_c = 125$ m/min e $v_{fc} = 600$ mm/min. O f_{az} tem uma influência maior, porém não se pode dizer que é significativa em relação aos outros fatores. Deve-se observar que a deformação elástica proveniente da grande retirada de massa dos furos próximos, pode ter influenciado no desvio da circularidade. Uma alternativa para isolar esta influência teria sido a realização de um único furo por corpo de prova.

TABELA 17 – ANOVA da Cilindridade com um grau de liberdade

FONTE	média	GL	média	F
faz	0,00023	1	0,000231	2,9584
Vfc	4,5E-05	1	4,51E-05	0,5776
Vc	5,5E-05	1	5,51E-05	0,7056
faz * Vfc	3,1E-06	1	3,13E-06	0,04
faz * Vc	3,1E-06	1	3,13E-06	0,04
Vfc * Vc	3,1E-06	1	3,13E-06	0,04
faz * Vc * Vfc	7,8E-05	1	7,81E-05	

GRÁFICO 5 - Representação da cilindridade no fresamento em cheio



Como foi comentado anteriormente a experimentação realizada é muito pobre no tocante a replicações, o que impede conclusões confiáveis sobre a significância das diferenças observadas entre fatores sobre os valores de cilindridade e circularidade.

5.1.3 A influência do tipo de fresamento (concordante X discordante)

Nesta etapa fez-se a usinagem FHI para acabamento de furos, verificando-se os tipos de fresamento (concordante x discordante), e avaliou-se a rugosidade pelos parâmetros Ra e R_{máx} e a circularidade.

Realizaram-se seis furos para acabamento, sendo três do tipo concordante e três discordantes, variando o diâmetro de 35mm para 38mm, e os parâmetros de cortes utilizados foram: $v_c=125$ m/min, $v_{fc} = 800$ mm/min e $f_{az} = 0,3$ mm.

Pode-se constatar que não houve, em média uma diferença significativa do tipo de fresamento sobre a rugosidade (Ra e R_{máx}). As tabelas 18 e 19 contêm, os valores da análise estatística, teste de significância para as variáveis dependentes Ra e R_{máx}. Com isso pode-se analisar que os valores de P para a rugosidade Ra e R_{máx} não são significativos.

Além disso, deve-se registrar que em operações de acabamento o R_{máx} apresentou um valor mais estável conforme apresentado no gráfico 7, em comparação aos valores observados no fresamento em cheio. Isso pode ser explicado pelo menor fluxo de cavaco e menor deformação plástica da superfície usinada, decorrentes da menor taxa de remoção.

Observa-se que proporcionalmente, o comportamento do R_{máx} é o mesmo observado no parâmetro Ra (vide gráfico 6).

TABELA 18 – Teste estatístico do Ra para os tipos de fresamento concordante e discordante

	média	Desvio padrão	t	P
Concordante	1,00667	0,0548483	0,132685	0,900849
Discordante	0,898333	0,120035		

TABELA 19 – Teste estatístico do R_{máx} para os tipos de fresamento concordante e discordante

	média	Desvio padrão	t	P
Concordante	4,952	0,869611	0,289629	0,786493
Discordante	5,091	0,587472		

GRÁFICO 6 – Representação do Ra médio no FHI discordante e concordante

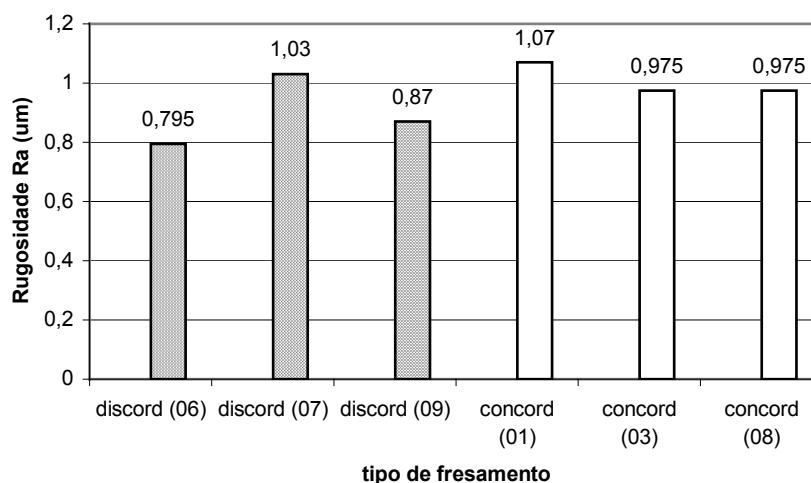
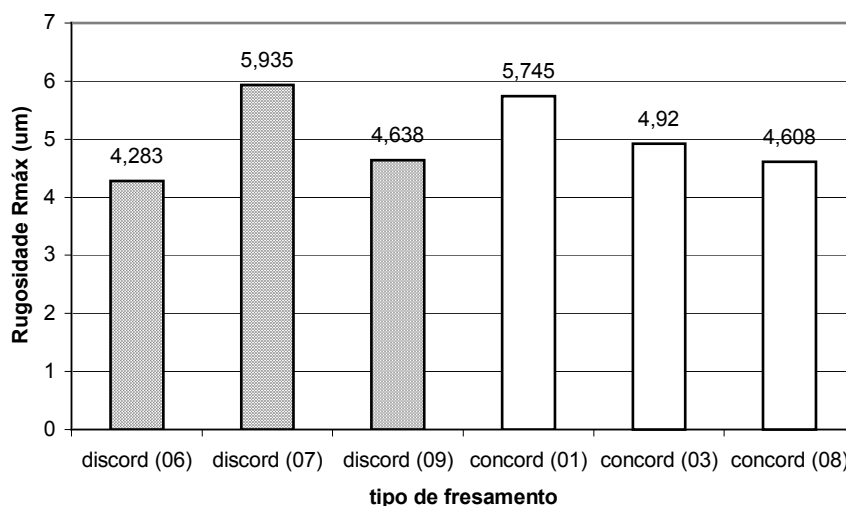
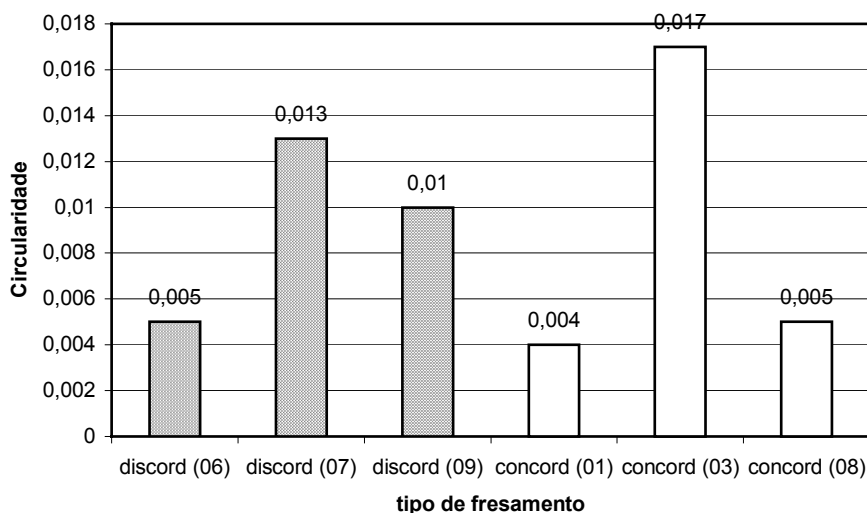


GRÁFICO 7 – Representação do Rmáx médio no FHI discordante e concordante



Na circularidade observa-se pelo gráfico 8 uma uniformidade na variação dos valores, entre os dois tipos de fresamento, com resultados inferiores aos obtidos do fresamento em cheio. Isso pode ser devido ao pequeno volume de material a ser removido.

GRÁFICO 8 – Representação da Circularidade para o FHI discordante e concordante



5.1.4 Comparação com o processo de mandrilamento

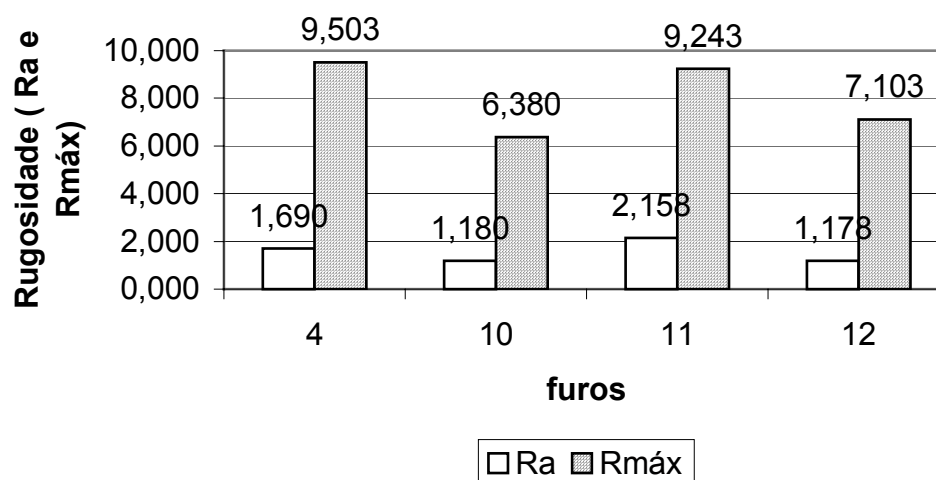
Para a quarta etapa, avaliou-se a rugosidade (R_a e $R_{máx}$) e a circularidade para o processo de mandrilamento utilizando a barra de mandrilar.

Foram usinados 04 furos com a barra de mandrilar, os valores de R_a avaliados aos parâmetros de corte apresentados na tabela 18, nos permite concluir que para $v_c = 225$ m/min, $f = 0,1$ mm/v e $a_p = 0,2$ (furo 10) tem-se o melhor acabamento, não muito distante do valor encontrado para $v_c = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/v e $a_p = 0,2$ mm (furo 12). Pode-se concluir que o acabamento deve melhorar quanto maior for a v_c .

TABELA 20 – Representação dos parâmetros de corte com os dados obtidos

FUROS	n (rpm)	a_p (mm)	f_z (mm/v)	R_a médio (μm)	$R_{máx}$ médio(μm)
04	1500	0,2	150	1,690	9,503
10	1500	0,2	150	1,180	6,380
11	1500	0,2	225	2,158	9,243
12	1005	0,4	120	1,178	7,103

GRÁFICO 9 – Representação do Ra e Rmáx no processo de mandrilamento

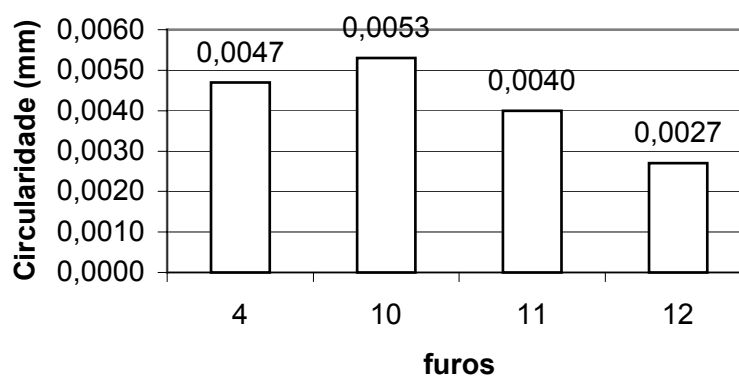


As variações dos valores são proporcionais ao Ra, porém apenas no furo 04 se constata uma pequena diferença. Isso pode ser devido a alguma interferência com cavaco que possa ter ocorrido no processo.

Apresenta-se abaixo o gráfico 10 mostrando os valores obtidos da circularidade dos furos mandrilados.

Nesta figura pode-se observar que o furo 12 obteve uma melhor circularidade, e como já foi visto, um melhor Ra e Rmáx, também.

GRÁFICO 10 – Representação da média da circularidade no mandrilamento



Além disso, fez-se um estudo em relação aos tempos de mandrilamento e a rugosidade Ra apresentada nos furos, onde os tempos são muito baixos e estão no gráfico 17.

5.1.5 Estudo da influência do tipo de máquina (M1 X M2)

Nesta quinta e última etapa, fez-se o comparativo das máquinas M1 e M2 através dos valores de rugosidade Ra para furos usinados utilizando o FHI.

Realizou-se quatro furos na máquina M1 em cheio e foi medida a rugosidade Ra, comparando os furos realizados com os mesmos parâmetros de corte na M2, apresentados na tabela 7 e 10.

As análises estatísticas dos valores da rugosidade Ra das máquinas M1 e M2, apresentam um resultado significativo pelos valores da tabela 20.

Com isso, pôde-se constatar que a máquina M2 possibilita um acabamento melhor em termos de rugosidade.

Nos gráficos 12 e 13 apresentam-se os valores encontrados para a circularidade e cilindricidade das máquinas, onde se encontram valores variando proporcional de uma máquina para outra.

Conclui-se que existem diferenças entre as máquinas, provavelmente devido às diferenças de rigidez e cinemática entre elas, mas não são diferenças significativas.

TABELA 21 – Representação estatística da comparação M1 e M2

Máquinas	Média Ra (um)	T	P
M1	1,3168	5,54089	0,00145836
M2	5,2348		

GRÁFICO 11 – Representação dos valores médios de Ra na comparação das máquinas

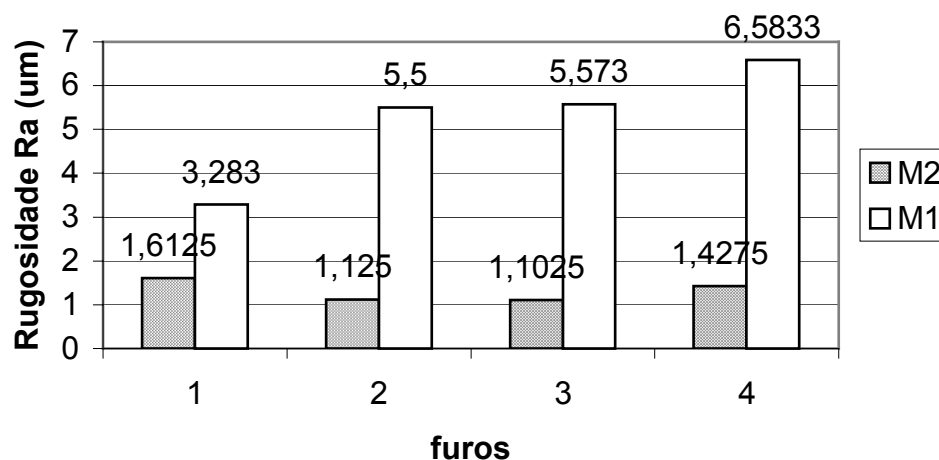


GRÁFICO 12 – Representação da circularidade média no FHI comparando as máquinas

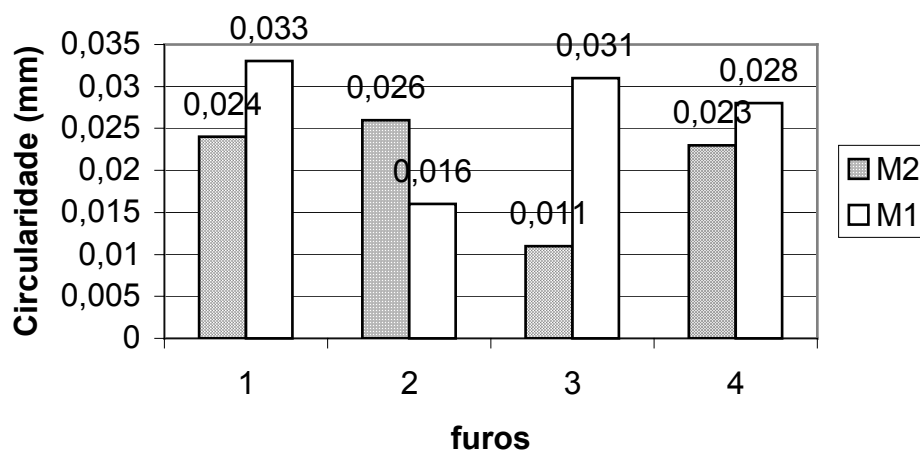
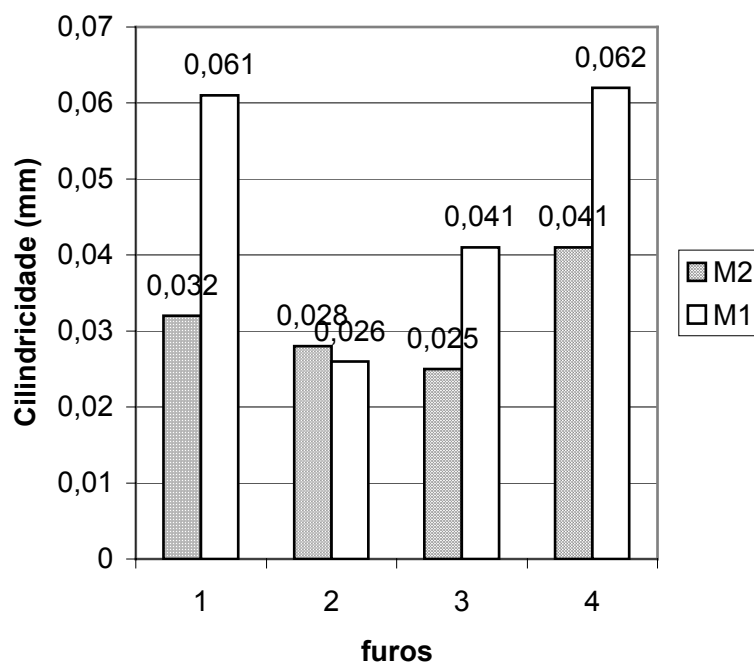


GRÁFICO 13 – Representação da cilindridade média no FHI comparando as máquinas



5.1.6 Estudo da rugosidade comparada ao tempo de usinagem

Neste tópico analisou-se os valores de rugosidade R_a com o tempo de usinagem, no fresamento FHI em cheio e no mandrilamento.

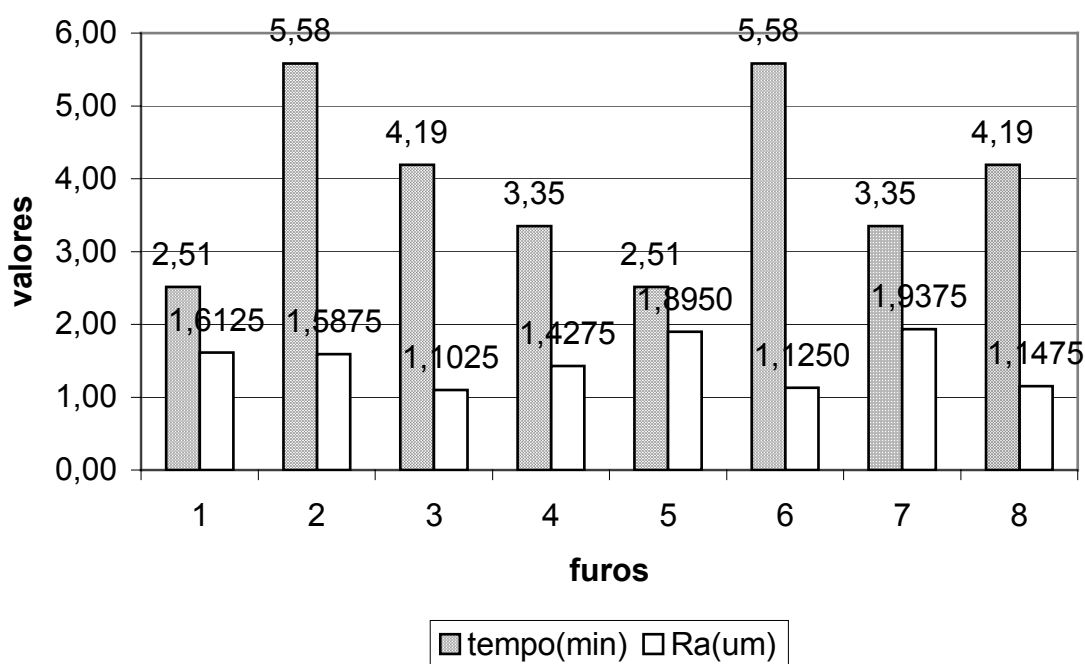
Pode-se observar que os valores de tempo são melhores nos furos 1 e 5 onde se encontram os parâmetros $v_{fc} = 800$ mm/min, $f_{az} = 0,5$ mm, v_c no furo 1 é 125 e no furo 5 é 100 m/min. Para a rugosidade (R_a), os melhores valores estão nos furos 3 e 6 onde se

encontram os parâmetros $v_c = 125$ m/min, $f_{az} = 0,3$ mm e v_{fc} no furo 3 é 800 e no furo 6 é 600 mm/min.

Com isso, pôde-se constatar que os fatores que mais influenciam o tempo é a v_{fc} e o f_{az} , pois quanto maior o v_{fc} e f_{az} menor será o tempo para realizar a usinagem. A rugosidade é influenciada pelo v_c e pelo f_{az} , onde o f_{az} como já se pôde observar no estudo preliminar, é o que mais influencia a rugosidade.

O f_{az} é o fator mais importante, pois vai influir nos resultados do tempo e na rugosidade. Quanto menor f_{az} melhor será a rugosidade. Com isso deve-se aumentar o v_{fc} , para não comprometer a produtividade do processo, procurando manter a qualidade.

GRÁFICO 14 – Representação do Ra x tempo no FHI em cheio

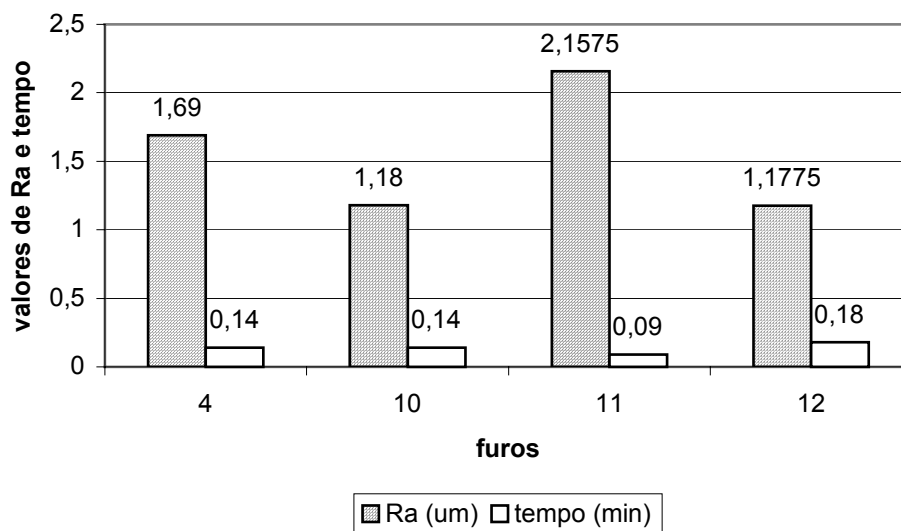


No mandrilamento pode-se observar que os furos 4 e 10 possuem os mesmos parâmetros de corte e as rugosidades diferentes, isso se deve a interferências na usinagem, possivelmente cavacos que riscarão a superfície. O melhor valor da rugosidade ficou no furo 12, onde as condições de corte são de $n = 1500$ rpm, $f = 120$ mm/v e $ap = 0,4$ mm, o que surpreende, devido o maior ap utilizado. No furo 11 onde o $f = 225$ mm/v a rugosidade deu um valor alto e o tempo deu um valor muito baixo, com isso pode-se concluir que deve existir um valor ótimo para o avanço e a rotação.

Para uma melhor análise deve-se replicar os furos pelo processo de mandrilamento, obtendo uma maior amostra ao experimento, assim tem-se valores mais confiáveis.

Com isso os valores de rugosidade são próximos aos valores do FHI em cheio, comprovando que o processo FHI pode ser realizado com bons resultados.

GRÁFICO 15 – Representação do Ra x tempo no mandrilamento



Após todas as discussões e os resultados apresentados, o capítulo 6 tem-se a conclusão a que se chegou, analisando todos os parâmetros de cortes, processos e máquinas utilizadas.

CAPÍTULO 6

6.1 CONCLUSÃO

A influência real dos diferentes parâmetros de corte, estudados neste trabalho, não foi possível de ser avaliada a partir dos experimentos propostos. Uma experimentação mais rica faz-se necessário para a quantificação dessas diferenças. Não obstante, pôde-se observar as seguintes tendências:

- valores menores de avanço axial (f_{az}) implicam em menor rugosidade da superfície usinada;**
- para as condições ensaiadas, o tipo de fresamento (concordante ou discordante) aparentemente não influencia a qualidade das superfícies usinadas;**
- nas duas máquinas-ferramenta utilizadas observou-se, para as condições ensaiadas, furos com rugosidades diferentes. Isto permite dizer que todos os resultados aqui obtidos devem ser interpretados como dependentes das máquinas-ferramenta utilizadas nos experimentos; e**
- de um modo geral, os valores de circularidade, clindricidade e rugosidade são equivalentes ou melhores que aqueles observados no processo de mandrilamento.**

Sob o ponto de vista da produtividade, pode-se constatar que o tempo de corte nas operações de desbaste (fresamento em cheio) e acabamento são muito altos quando comparados a outros processos, como por exemplo a furação e o mandrilamento. Entretanto, o Fresamento Helicoidal Interpolado propicia uma maior racionalização de ferramentas, ou seja, uma mesma fresa pode ser aplicada na usinagem superfícies internas (furos) e externas (cilindros) para uma larga faixa de diâmetros e também em operações de fresamento periférico e frontal.

Além disso, por se tratar de uma ferramenta flexível, a fresa utilizada neste processo pode ficar residente no magazine da máquina, reduzindo, de forma

significativa, seu tempo de preparação, quando comparado às trocas de brocas e (ou) barras de mandrilar.

Como conclusão geral, pode-se afirmar que Fresamento Helicoidal Interpolado é uma técnica eficiente em empresas que trabalhem sob encomenda e com alta diversificação. O melhor exemplo desse tipo de empresa é uma ferramentaria.

CAPÍTULO 07

7.1 REFERÊNCIAS

- 1 AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. dos SANTOS; LIRANI, J. **Princípios de engenharia de fabricação mecânica**. 6ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995, p.295.
- 2 AHMED, M. S. **Radio Frequency Based Adaptive Control for Electrical Discharge Texturing**, EDM Digest, IX (5), p. 8-10, 1987.
- 3 ARMSTRONG, W.H. **Machine tools for metals cutting**. New York: 1957.
- 4 ABNT. **NBR 6162**: movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. Rio de Janeiro, outubro, 1989.
- 5 ABNT. **NBR 6163**: geometria da cunha de corte. Rio de Janeiro, maio, 1990.
- 6 ABNT. **NBR 6175**: processos mecânicos de usinagem – terminologia e classificação. Rio de Janeiro, 1971.
- 7 ABNT. **NBR 6405**: rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, janeiro, 1988.
- 8 ABNT. **NBR 6409**: tolerâncias de forma e tolerâncias de posição. Rio de Janeiro, 1976.
- 9 BARROS NETO, B. de SCARMINIO I. S.; BRUNS R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Universidade de Campinas, 1996.
- 10 BENEDICT, G. F. **Nontraditional Manufacturing Processes**. [s.l.] Ed. Dekker, 1987.
- 11 BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters**. [s.n.t.] 1978.
- 12 CATÁLOGO SANDVIK COROMANT. **Produtos para usinagem Ferramentas Rotativas**. Janeiro, 2001.
- 13 CATÁLOGO SECO. **Guia Técnico**: Fresamento – Dados de corte. São Paulo, p. 186 e 187, 2001.
- 14 CATÁLOGO ROMI. **Romicron**. 2000.
- 15 CATÁLOGO KENNAMETAL. Ferramentas rotativas, São Paulo, 2002.
- 16 CHANSEL P. Como reduzir a rugosidade da superfície de peças fresadas. **Revista Máquinas e Metais**, v.36, n. 419, p. 30-34, dez. 2000.
- 17 CORREA, M; NOVASKI, O.; LIMA, F.E.; AMBROGI, V.S. O fresotorneamento ortogonal radial em HSC aplicado a virabrequins. **O mundo da usinagem**. Campinas, abril, 2001.
- 18 DAPRA Corporation, **Using helical interpolation to make large-diameter holes**. 2002.
- 19 DEGARMO, E. P.; BLACK J.T.; KOHSER, R.A.. **Materials and Processes in Manufacturing**. 8ªed, 2000.
- 20 FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo, Edgard Blücher, 1970.
- 21 FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais**. 8ªed São Paulo, ABM, 1974.

- 22 GABOR, H. Como atuam os alargadores. **Revista Máquinas e Metais**, v.18, n.205, p. 16-21, set. 1982.
- 23 GOMES, J. O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado DIN 1.2083, na liga de Alumínio (AMP8000) e na liga de cobre (Cu-Be)**. Florianópolis; 2001. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- 24 HEISEL U., RUZICZKA G. A usinagem de furos por fresofuração e fresomandrillamento. **Revista Máquinas e Metais**, v.34, n. 389, p. 16-27, jun. 1998.
- 25 HYPERTHERM, Inc. **20 Tears to practical plasma**. Hanover, 1978.
- 26 KÖNIG, W. **Tecnologia da Fabricação**. Tornear, fresar e furar. v.1 (direitos de tradução reservados por Prof. Walter L. Weingaertner), 1981.
- 27 KÖNIG W. **Tecnologia da Fabricação**. Retífica, brunimento e lapidação. v. 2 (direitos de tradução reservados por Prof. Walter L. Weingaertner), 1981.
- 28 MARQUES, J.M. **Estatística para cursos de engenharia**. Curitiba, UFPR, 2000.
- 29 MCGEOUGH, J. A. **Advanced Method of Machinig**. [s.l.] Chapman and Hall, 1988.
- 30 METALS handbook: **Reaming**. Machining. 9th, American Society for Metals, p. 239-248, 1989, v.16.
- 31 NANNI, L. F., RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. 2 ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992, p.185.
- 32 NETER, J; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W. **Applied Linear Statistical Models**. 4th, McGraw-Hill, 1996.
- 33 RYKALUN, N.; UGLON, A.; KOKORA, A. **Laser machining and welding**. [s.l.] Mir Publishers, USSR, 1978.
- 34 SANTOS, S. C. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral**. Uberlândia, 1999, p.108 (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Uberlândia.
- 35 SILVA da R.B., ABRÃO A. M., MACHADO A. R. SILVA M. B. Alargamento cônico do ferro fundido nodular GGG40. **Revista Máquinas e Metais**, v.37, n. 430, p. 174-183, nov.2001.
- 36 SNEDECOR, G. W., COCHRAN, W. G. **Statistical Methods**. 7th, Iowa State University Press, 1982, p.593.
- 37 STEMMER, G. Erich. **Ferramentas de Corte II**: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992, p.314.
- 38 TÖNSHOF, H. K., SPINTING, W., KÖNIG, W., NEISES, A. **Machining of holes: developments in drilling technology**. Annal of the CIRP v. 43, p. 551-561, 1994.
- 39 WEIGAERTNER W.L.; SCHROETER R.B.; MÜHLE H. B. A influência do balanceamento no processo com cabeçotes de excentricidade regulável. **Revista Máquinas e Metais**, v.38, n.435, p. 344-357, abr. 2002.

- 40 WEINERT, K.; ADAMS, F.; BIERMANN, D.; THAMKE, D. Alargadores de corte único: corte mais eficiente, além de vantagens econômicas. **Revista Máquinas e Metais**, v.34, n.384, p. 38-57, jan., 1998.
- 41 WEINERT K. e LÖBBE H. A furação profunda do aço inoxidável. **Revista Máquinas e Metais**, v.38, n. 432, p. 54-61, jan. 2002.
- 42 WEIKERT S., RITTER R. Fresamento circular versus mandrilamento. **Revista Máquinas e Metais**, v.38, n.435, p. 48-55, abr. 2002.

APÊNDICE 08

FORMULÁRIO PARA ANOVA

CÁLCULO DAS MÉDIAS DAS MEDIDAS OBTIDAS:

$$média = \text{ponto01} + \text{ponto02} + \text{ponto03} + \text{ponto04} / n$$

CÁLCULO DA MÉDIA DE DUAS VARIÁVEIS

$$XM11.. = média[média(600 / 100 / 0,3) + (média(600 / 125 / 0,3))]$$

$$XM12.. = média[média(800 / 100 / 0,3) + (média(800 / 125 / 0,3))]$$

$$XM21.. = média[média(600 / 100 / 0,5) + (média(600 / 125 / 0,5))]$$

$$XM22.. = média[média(800 / 100 / 0,5) + (média(800 / 125 / 0,5))]$$

$$XM1.1. = média[média(600 / 100 / 0,3) + (média(800 / 100 / 0,3))]$$

$$XM1.2. = média[média(600 / 125 / 0,3) + (média(800 / 125 / 0,3))]$$

$$XM2.1. = média[média(600 / 100 / 0,5) + (média(800 / 100 / 0,5))]$$

$$XM2.2. = média[média(600 / 125 / 0,5) + (média(800 / 125 / 0,5))]$$

$$XM.11. = média[média(600 / 100 / 0,3) + (média(600 / 100 / 0,5))]$$

$$XM.12. = média[média(600 / 125 / 0,3) + (média(600 / 125 / 0,5))]$$

$$XM.21. = média[média(800 / 100 / 0,3) + (média(800 / 100 / 0,5))]$$

$$XM.22. = média[média(800 / 125 / 0,3) + (média(800 / 125 / 0,5))]$$

CÁLCULO DA MÉDIA EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS faz, Vfc e Vc

$$XM1... = média[média(600 / 100 / 0,3) + média(600 / 125 / 0,3) + média(800 / 100 / 0,3) + média(800 / 125 / 0,3)]$$

$$XM2... = média[média(600 / 100 / 0,5) + média(600 / 125 / 0,5) + média(800 / 100 / 0,5) + média(800 / 125 / 0,5)]$$

$$XM.1.. = média[média(600 / 100 / 0,5) + média(600 / 100 / 0,3) + média(600 / 125 / 0,3) + média(600 / 125 / 0,5)]$$

$$XM.2.. = média[média(800 / 100 / 0,5) + média(800 / 100 / 0,3) + média(800 / 125 / 0,3) + média(800 / 125 / 0,5)]$$

$$XM.1. = média[média(600 / 100 / 0,3) + média(600 / 100 / 0,5) + média(800 / 100 / 0,3) + média(800 / 100 / 0,5)]$$

$$XM.2. = média[média(600 / 125 / 0,3) + média(600 / 125 / 0,5) + média(800 / 125 / 0,3) + média(800 / 125 / 0,5)]$$

CÁLCULO DA MÉDIA

$$MÉDIA = média(XM1... + XM2... + XM.1.. + XM.2.. + XM..1. + XM..2.)$$

CÁLCULO DE SSA, SSB, SSC, SSAB, SSAC, SSBC

$$SSA = n \times B \times C \times \left[(XM1... - MÉDIA)^2 + (XM2... - MÉDIA)^2 \right]$$

$$SSB = n \times A \times C \times \left[(XM.1.. - MÉDIA)^2 + (XM.2.. - MÉDIA)^2 \right]$$

$$SSC = n \times A \times B \times \left[(XM..1. - MÉDIA)^2 + (XM..2. - MÉDIA)^2 \right]$$

$$SSAB = n \times C \times \left[(XM11.. - XM1... - XM.1.. + MÉDIA)^2 + (XM12.. - XM1... - XM.2.. + MÉDIA)^2 + \right. \\ \left. + (XM21.. - XM2... - XM.1.. + MÉDIA)^2 + (XM22.. - XM2... - XM.2.. + MÉDIA)^2 \right]$$

$$SSAC = n \times B \times \left[(XM1.1. - XM1... - XM..1. + MÉDIA)^2 + (XM1.2. - XM1... - XM..2. + MÉDIA)^2 + \right. \\ \left. + (XM2.1. - XM2... - XM..1. + MÉDIA)^2 + (XM2.2. - XM2... - XM..2. + MÉDIA)^2 \right]$$

$$SSBC = n \times A \times \left[(XM.11. - XM.1.. - XM..1. + MÉDIA)^2 + (XM.12. - XM.1.. - XM..2. + MÉDIA)^2 + \right. \\ \left. + (XM.21. - XM.2.. - XM..1. + MÉDIA)^2 + (XM.22. - XM.2.. - XM..2. + MÉDIA)^2 \right]$$

CÁLCULO DA MÉDIA DAS MÉDIAS DAS VARIÁVEIS

$$XM111. = \left[média(600/100/0,3) - XM11.. - XM1.1. - XM.11. + XM1... + XM.1.. + XM..1. - MÉDIA \right]^2$$

$$XM211. = \left[média(600/100/0,5) - XM21.. - XM2.1. - XM.11. + XM2... + XM.1.. + XM..1. - MÉDIA \right]^2$$

$$XM112. = \left[média(600/125/0,3) - XM11.. - XM1.2. - XM.12. + XM1... + XM.1.. + XM..2. - MÉDIA \right]^2$$

$$XM212. = \left[média(600/125/0,5) - XM21.. - XM2.2. - XM.12. + XM2... + XM.1.. + XM..2. - MÉDIA \right]^2$$

$$XM121. = \left[média(800/100/0,3) - XM12.. - XM1.1. - XM.21. + XM1... + XM.2.. + XM..1. - MÉDIA \right]^2$$

$$XM221. = \left[média(800/100/0,5) - XM22.. - XM2.1. - XM.21. + XM2... + XM.2.. + XM..1. - MÉDIA \right]^2$$

$$XM122. = \left[média(800/125/0,3) - XM12.. - XM1.2. - XM.22. + XM1... + XM.2.. + XM..2. - MÉDIA \right]^2$$

$$XM222. = \left[média(800/125/0,5) - XM22.. - XM2.2. - XM.22. + XM2... + XM.2.. + XM..2. - MÉDIA \right]^2$$

CÁLCULO DO SSABC

$$SSABC = n \times (XM111. + XM211. + XM112. + XM212. + XM121. + XM221. + XM122. + XM222.)$$

CÁLCULO DO SSTR

$$SSTR = SSA + SSB + SSC + SSAB + SSAC + SSBC + SSABC$$

CÁLCULO DO SSTO

$$SSTO = \sum \left[\left(\frac{ponto01}{MÉDIA} \right) + \left(\frac{ponto02}{MÉDIA} \right) + \left(\frac{ponto03}{MÉDIA} \right) + \left(\frac{ponto04}{MÉDIA} \right) \right]$$

PARA TODOS OS PONTOS DE TODAS AS VARIÁVEIS MEDIDAS

CÁLCULO DO SSE

$$SSE = SSTO - SSTR$$